BAUBUCH

TOPP

Buchreihe Elektronik 131

Markus Böhm

Funktions-generator

TOPP

Buchreihe Elektronik 131

Markus Böhm

Funktionsgenerator

Bauanleitung und Meßpraxis

Frech-Verlag Stuttgart

ISBN 3-7724-0309-3 · Best.-Nr. 131

© 1980

frech-verlag
GmbH + Co. Druck KG Stuttgart

Wissenschaftliche Assistenz:
Professor Otmar Kilgenstein

Druck: Frech Stuttgart

Der Verlag bittet zu beachten:

Unsere Veröffentlichungen von Schaltungen und Verfahren erfolgen ohne Rücksicht auf bestehende Patente, da sie nur für Amateur- und Lehrzwecke bestimmt sind. Eine gewerbliche Nutzung ist ausdrücklich untersagt.

Trotz sorgfältiger Überprüfung aller Schaltungen und Angaben durch Verfasser und Verlag lassen sich Fehler nie ganz vermeiden. Der Verlag kann deshalb weder eine Garantie für Fehlerlosigkeit noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung übernehmen. Verfasser und Verlag sind für Hinweise auf Fehler sowie für Verbesserungs- oder Ergänzungsvorschläge dankbar.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 6

2. Funktionsgenerator – Bauanleitung
2.1. Das Funktionsgenerator-IC ICL 8038 . . 7
2.2. Die Schaltung des Funktionsgenerators . 13
2.3. Der praktische Aufbau des Funktionsgenerators 20

3. Funktionsgenerator – Meßpraxis
3.1. Technische Daten und Oszillogramme zum Funktionsgenerator 34
3.2. Definitionen zur Rechteck-, Dreieck- und Sinusfunktion 43
3.3. Datenblatt zum Funktionsgenerator . . . 47
3.4. Der Funktionsgenerator bei ohmsch-kapazitiver Last 48

4. Anhang
Bohrschablonen 56
Abstreichlisten:
Bestückung der Leiterplatte 59
Montage des Gehäuses 65
Verdrahtung 67
Reproduktionsvorlagen:
Beschriftung der Frontplatte 72
Printplatte 75

5. Tafeln 77

1. Einleitung

Mit der rasanten Fortentwicklung der integrierten Schaltungstechnik kommen in zunehmender Zahl Spezial-ICs auf den Markt, die komplette Baugruppen ersetzen. Ein Beispiel hierfür ist das Funktionsgenerator-IC ICL 8038. Es handelt sich hierbei um einen integrierten Baustein, mit dem Rechteck-, Dreieck- und Sinusschwingungen hoher Genauigkeit erzeugt werden können.
Der vorliegende Band enthält eine komplette Bauanleitung für einen Funktionsgenerator, der mit dem ICL 8038 aufgebaut wurde. Der Frequenzbereich des beschriebenen Gerätes reicht von 0,02 Hz bis 200.000 Hz, Amplitude und Offset sind in weiten Grenzen einstellbar. Die Ausgangsfrequenz kann zudem über einen besonderen Eingang mit Hilfe einer externen Steuerspannung frequenzmoduliert werden. Der Ausgang ist umschaltbar auf Sinus, Dreieck und Rechteck, zusätzlich können auch Sägezahnfunktionen erzeugt werden.

Zu dieser sehr ausführlich gehaltenen Bauanleitung, die neben den Schaltplänen auch noch Printvorlagen, Bestückungspläne, Konstruktionszeichnungen und Verdrahtungspläne enthält, ist ein vollständiger Bausatz lieferbar. Der Bausatz enthält alle zum Nachbau des Gerätes erforderlichen Einzelteile einschließlich einer gebohrten und beschrifteten Frontplatte, der Printplatte und des Gehäuses, so daß sich der Nachbau des Funktionsgenerators sehr einfach gestaltet. Dieser Bausatz kann von der Firma Reuter Elektronik KG, Artlenburger Straße 32–34, 2400 Lübeck, bezogen werden.
Anhand zahlreicher Oszillogramme werden weiterhin die technischen Eigenschaften des Funktionsgenerators untersucht und Hinweise für die Handhabung des Gerätes gegeben. Die fundamentalen Begriffe und Definitionen, die zur Beschreibung von Impulsen erforderlich sind, wurden tabellarisch zusammengefaßt.

2. Funktionsgenerator (Bauanleitung)

2.1. Das Funktionsgenerator-IC ICL 8038

Der im folgenden beschriebene Funktionsgenerator wird mit einem monolithisch integrierten Schaltkreis, dem Funktionsgenerator-IC ICL 8038, aufgebaut.
Das IC enthält bereits alle für den Aufbau eines Funktionsgenerators erforderlichen Schaltungen, so daß nur noch wenige Bauelemente, hauptsächlich die Stromversorgung und ein Ausgangsverstärker für die Funktionsausgänge, extern angeschlossen werden müssen. Dies vereinfacht weitgehend den praktischen Aufbau, so daß auch ein weniger versierter Amateur das Gerät ohne Schwierigkeiten nachbauen kann.
Selbstverständlich würde eine genauere Beschreibung der Halbleitermechanismen des in monolithischer Technologie unter Verwendung von Dünnfilmwiderständen und integrierten Schottky-Dioden hergestellten ICs den Rahmen dieses Baubuches übersteigen, dennoch sollte man in groben Zügen die Funktionsweise des Bausteins kennen, um nachher die Schaltungen verstehen zu können.
Das Bild 1A zeigt stark vereinfacht in Form eines Blockschaltbildes die interne Verschaltungen des ICL 8038. (Bild 1B wurde dem Datenblatt zum ICL 8038 entnommen und zeigt die komplette Schaltung im Detail, jedoch wollen wir uns zunächst auf die Betrachtung des übersichtlicheren Blockschaltbildes beschränken.) Der gestrichelt eingezeichnete Kondensator C ist nicht im IC enthalten und muß extern als Zeitbemessungsglied zwischen Pin (Anschlußstift am IC-Gehäuse) 10 und 11 angeschlossen werden.
Als Ausgangsfunktion, von der die übrigen Funktionen durch entsprechende Schaltungen abgeleitet werden, dient in diesem Falle nicht wie bei den meisten Generatoren eine Sinusfunktion, sondern die Rampenfunktion, also eine zeitlinear verlaufende Spannungsänderung.
Der Schalter S sei geöffnet und der Kondensator C völlig entladen. Die Stromquelle I lädt dann den Kondensator C mit einem Konstantstrom I_1 auf. Der Betrag des Stromes I_1 wird extern mit einem Widerstand R_A, der zwischen Pin 4 und der positiven Versorgungsspannung + Uv liegt, eingestellt. Dem Gesetz $U_C = (1/C) \cdot \int I_C \, dt$ wobei $I_C = I_1$ folgend, wird die Spannung U_C am Kondensator linear mit der Zeit ansteigen. (Für I_C = konst. wird $\int I_C \, dt$ zu $I_C \cdot t$!) Sowie die Spannung U_C einen am Komparator I fest eingestellten Wert U_{Cmax} überschreitet, schaltet der Komparator durch und wird am Ausgang positiv. Diese Einschaltflanke triggert das Flip-Flop, das seinerseits dann den Schalter S schließt, der durch einen Transistor realisiert wird. Damit ist Stromquelle I und Stromquelle II verbunden. Der Strom I_2 den die Stromquelle II liefert,

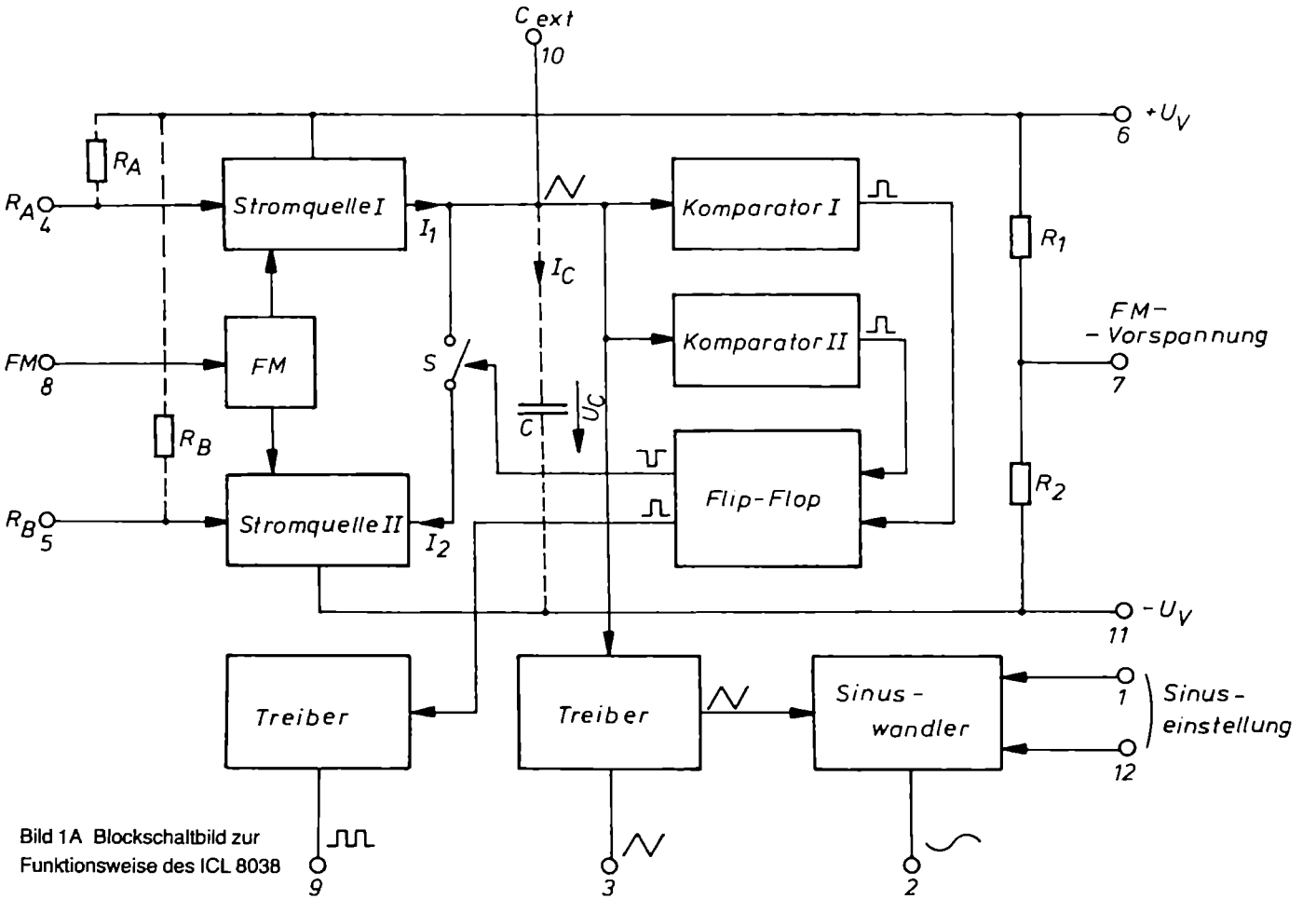


Bild 1A Blockschaltbild zur Funktionsweise des ICL 8038

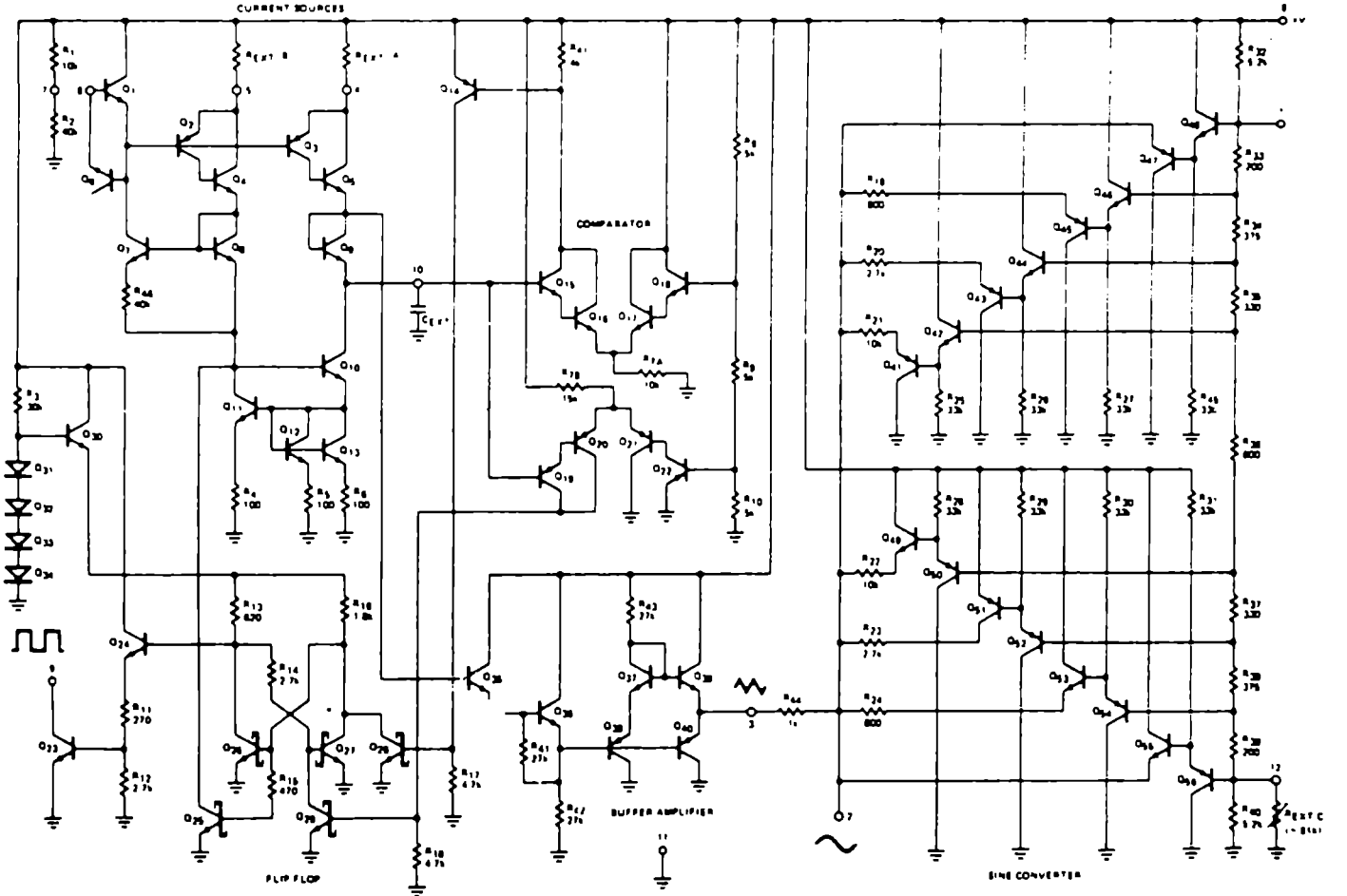


Bild 1B Detaillierte interne Verschaltung des ICL 8038. (Dieser Schaltplan wurde einem Datenblatt der Firma Intersil zum ICL 8038 entnommen.)

hat umgekehrte Polarität wie I_1 und ist dem Betrage nach ein λ-faches von I_1, wobei $\lambda > 1$ und somit $|I_2| > |I_1|$. Der Strom I_2 kann ebenfalls durch einen Widerstand R_B festgelegt werden. R_B wird zwischen Pin 5 und der positiven Versorgungsspannung $+U_V$ angeschlossen. Stromquelle II muß einen Konstantstrom I_2 ziehen, der dem Betrage nach größer als I_1 ist. Da die Konstantstromquelle I aber nur den Strom I_1 nachliefern kann, wird der Differenzstrom aus dem Kondensator gezogen. Es gilt demnach:

$$I_2 = I_1 + I_C;\quad I_2 = \lambda I_1;\quad -\lambda I_1 = I_1 + I_C;$$
$$I_C = -\lambda I_1 - I_1 = -(\lambda - 1)\, I_1.$$

Die Spannung am Kondensator C nimmt nunmehr, dem Gesetz $U_C = (1/C) \int I_C\, dt = -(1/C) \int (\lambda - 1)\, I_1\, dt$ folgend, zeitlinear ab. Sowie U_C einen fest eingestellten Wert U_{Cmin} unterschreitet, schaltet der Komparator II durch und über das Flip-Flop wird der Schalter S wieder geöffnet. Damit setzt der beschriebene Arbeitszyklus erneut ein.

Für $\lambda = 2$ ist der Lade- und Entladestrom gleich groß, und es fällt am Kondensator eine dreieckförmige Spannung mit dem Tastverhältnis 1 : 1 ab. Durch Abändern der Programmierwiderstände R_A und R_B kann das Tastverhältnis, das sich verhält wie $R_A : R_B$, in weiten Grenzen variiert werden; es ist ein Tastverhältnis 99 : 1 bzw. 1 : 99 erreichbar. Bei einem so extremen Tastverhältnis entartet die Dreieckfunktion in eine Sägezahnfunktion.

Die Kondensatorspannung U_C wird einer Treiberstufe zugeführt, der Ausgang des Treibers ist mit Pin 3 verbunden. Als Rechteckfunktion dient die am Ausgang des Flip-Flops anliegende Spannung, die ebenfalls über eine Treiberstufe hinreichend verstärkt wird. Der Rechteckausgang liegt am Pin 9.

Da man bei der Konzeption des IC als Basisfunktion die Dreieckfunktion anstelle des Sinus wählte, bereitet die nachträgliche Erzeugung einer Sinusfunktion einige Schwierigkeiten. Mit einem trickreichen Sinuswandler, der die Dreieckspannung in eine Sinusspannung umformt, konnte man sich jedoch gut hel-

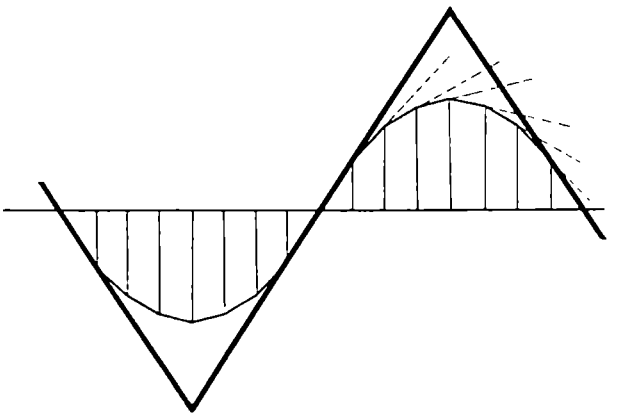


Bild 2 Zur Funktionsweise des Sinuswandlers

fen. Bild 2 veranschaulicht graphisch die Ableitung des Sinus aus dem Dreieck. Der Zeitabschnitt zwischen 2 Nulldurchgängen der Kondensatorspannung wird dabei in zahlreiche Teilintervalle unterteilt. Von Intervall zu Intervall wird die Kondensatorspannung mit Hilfe eines Abschwächers unterschiedlich stark abgeschwächt, woraus sich dann der auf Bild 2 dargestellte Verlauf konstruieren läßt.
Unmittelbar nach dem Nulldurchgang wird die Dreieckspannung relativ gering abgeschwächt, mit zunehmender Spannung wird das Signal schrittweise immer stärker heruntergeteilt. Diese schrittweise Veränderung des Teilungsverhältnisses erreicht man mit Transistorstufen, die mit zunehmender Dreieckspannung immer mehr Widerstände eines aus einer Widerstandskette bestehenden Spannungsteilers kurzschließen und somit das Signal von Intervall zu Intervall stärker herunterteilen. Wenn man eine Periode in hinreichend viele Abschnitte unterteilt, erhält man eine sehr gut angenäherte Sinuskurve. Tatsächlich liegt der Klirrfaktor nach Abgleich für den Bereich unter 200 kHz nach Angaben von Intersil unter 1%, was für Amateurzwecke ein sehr guter Wert ist. Der Abgleich des Sinuswandlers erfolgt über die Anschlüsse 1 und 12 und wird im Rahmen der Schaltungsbeschreibung des Geräts genau erläutert.
Auf Bild 3 wurden zur Verdeutlichung der Funktionsweise des ICL 8038 nochmals die Zeitverläufe und

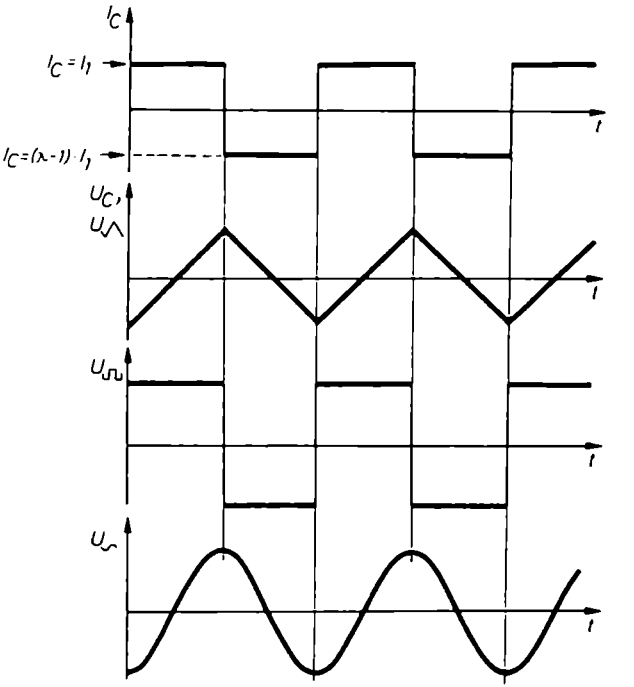


Bild 3 Zeitliche Zuordnung der Strom- und Spannungsverläufe beim ICL 8038

Phasenbeziehungen der Ausgangsfunktionen und des Lade- bzw. Entladestromes dargestellt. Das Tastverhältnis beträgt 1 : 1. Haben wir beispielsweise ein Tastverhältnis von 99 : 1, so wird aus dem Dreieck

ein Sägezahn, die Rechtecke entarten in Nadelimpulse, und der Sinus wird jeweils nach einem positiven sinusförmigen Anstieg abrupt unterbrochen. Bei derartig extremen Tastverhältnissen ist nur noch die Sägezahnfunktion von praktischer Bedeutung.

Aus den bisherigen Betrachtungen geht hervor, daß die Frequenz der Ausgangsfunktionen durch entsprechende Bemessung des Kondensators C und der Ströme I_1 und I_2 festgelegt wird. Wählt man für den Kondensator C einen festen Wert, so kann die Frequenz nur noch durch die Ströme I_1 und I_2 eingestellt werden. Die Ströme I_1 und I_2 hängen ihrerseits jedoch ab von den Programmierwiderständen R_A und R_B, wie bereits erläutert wurde, zudem noch – darauf sei nunmehr näher eingegangen – von der am Pin 8 (FM) anliegenden Spannung. Der mit FM (FM = Frequenz-Modulation) bezeichnete Block steuert die Stromquellen I und II und ändert linear zu der am Pin 8 angelegten Steuerspannung die Ströme I_1 und I_2 gleichermaßen. Da die Frequenz linear vom Betrag der Ströme I_1 und I_2 abhängt, ergibt sich hier die Möglichkeit, die Frequenz durch eine an Pin 8 anzulegende Steuerspannung zu modulieren. Das Tastverhältnis bleibt dabei nahezu unverändert, es wird nach wie vor durch das Verhältnis $R_A : R_B$ bestimmt. Der maximal erreichbare Frequenzhub, also das Verhältnis von Höchst- zu Mindestfrequenz, die durch Anlegen der Wobbelspannung an Stift 8 erreichbar ist, beträgt nach Angaben von Intersil 1 : 1000. Die prozentuale Abweichung vom linearen Zusammenhang zwischen FM-Steuerspannung und Frequenz ist kleiner als 0,2%. Falls bei gewissen Schaltungsvarianten die Frequenz nicht mit dem FM-Eingang Pin 8 eingestellt werden soll, so bietet der Hersteller die Möglichkeit, den Stift 8 mit Stift 7 zu verbinden und den Steuereingang somit auf ein festes Potential zu legen. Pin 7 bleibt aber in der im folgenden beschriebenen Schaltung offen.

Abschließend sei noch Bild 1 B erwähnt, welches dem Intersil-Datenblatt zum ICL 8038 entnommen wurde. Dieses Bild zeigt detailliert den schaltungsmäßigen Aufbau des integrierten Schaltkreises, wobei man durch Vergleich mit dem Blockschaltbild 1 A recht gut die einzelnen Schaltungsblöcke erkennen kann. Es sei darauf hingewiesen, daß das Flip-Flop (in Bild 1 B links unten!) mit Schottky-Transistoren ausgerüstet ist, welche an dem S-förmigen Symbol für die Basis der jeweiligen Transistoren erkennbar sind. Schottky-Transistoren schalten besonders schnell, da bei dieser Technik die Speicherzeit von Minoritätsladungsträgern in der Basiszone durch eine Diode zwischen Basis und Collector erheblich verkürzt wird. Durch Anwendung dieser Technologie lassen sich die Anstiegs- bzw. Abfallzeiten stark verkürzen, was natürlich eine bessere Rechteck-Kurvenform bewirkt.

2.2. Die Schaltung des Funktionsgenerators

Bild 4 stellt die komplette Schaltung des mit dem ICL 8038 aufgebauten Funktionsgenerators dar, jedoch ohne Stromversorgungsteil; dieses soll anschließend gesondert betrachtet werden.
Wie aus Bild 4 hervorgeht, sind zum Aufbau des Generators neben dem ICL 8038 nur noch sehr wenige passive Bauelemente sowie ein Operationsverstärker erforderlich. Die dekadisch abgestuften Kondensatoren C_6 – C_{11} dienen als Zeitbemessungskondensatoren; der jeweils nächstfolgende Kondensator hat nur noch ein 1/10 der Kapazität des vorhergehenden Kondensators. Mit dem 6-poligen Stufenschalter St_1 kann jeweils einer der 6 Kondensatoren mit Pin 10 des Funktionsgenerator-Chips verbunden werden. St_1 dient also zur stufenweisen Grobeinstellung der Frequenz. Ist C_6 mit Pin 10 verbunden, so kann am Ausgang die niedrigste Frequenz entnommen werden. Wird der Stufenschalter nach rechts bewegt, nacheinander also die Kondensatoren C_7 – C_{11} angeschlossen, so multipliziert sich die Frequenz mit jedem Schritt mit dem Faktor 10.
Die beiden Programmierwiderstände R_A und R_B, mit denen – wie bereits im vorhergehenden Abschnitt erläutert wurde – der Konstantstrom der Stromquellen I und II eingestellt werden kann, sind im Schaltplan mit R_{10} und R_{11} bezeichnet. Die Widerstände R_{16} – R_{15} – R_{18} bilden einen Spannungsteiler; am Schleifer des Potentiometers R_{15} kann eine variable Gleichspannung entnommen werden, die als FM-Vorspannung dient, sofern sich der Schalter S_2 in der eingezeichneten Stellung befindet. Die Frequenzfeinregelung erfolgt also über den FM-Eingang und nicht über die Programmierwiderstände R_{10} und R_{11}. Die Widerstände R_{10} und R_{11} müssen genau auf 3,19 kΩ eingestellt werden, damit man mit der in der Stückliste angegebenen Dimensionierung der Kondensatoren C_6 – C_{11} und des Spannungsteilers R_{16} – R_{15} – R_{18} die im Datenblatt 3.3. genannten Frequenzbereiche erhält. Mit dem Regler R_{15} kann dann der gesamte Frequenzbereich zwischen zwei Grobeinstellungen des Stufenschalters St_1 überstrichen werden.

Wird S_2 in die obere Stellung umgeschaltet, so ist die Frequenz extern über eine zwischen die Buchsen B_1 (4-mm-Buchse) oder B_2 (BNC-Buchse) und B_5 (Masse) anzulegende Steuerspannung einzustellen. Legt man zwischen B_1/B_2 und B_5 eine Wechselspannung, so wird sich die Ausgangsfrequenz dem jeweiligen Momentanwert der Steuerspannung folgend, ändern. Die zwischen B_1/B_2 und B_5 anzulegende Steuerspannung kann zwischen +4 V und +12 V schwanken. Werden diese Grenzwerte über- bzw. unterschritten, so setzt der Generator aus, d. h., die Ausgangsfrequenz wird 0 Hz. Der Frequenzhub, also

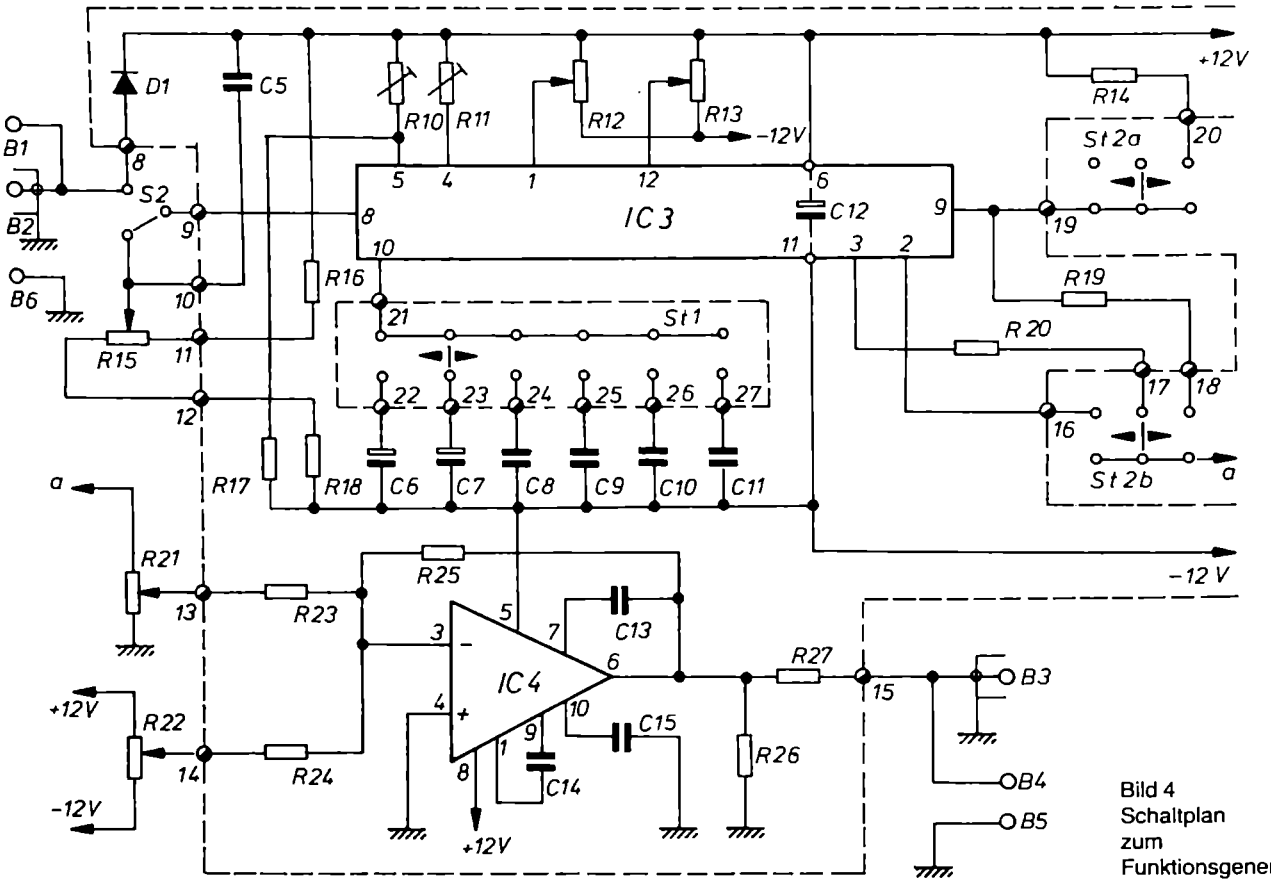


Bild 4
Schaltplan
zum
Funktionsgenerator

das Verhältnis von maximaler zu minimaler Ausgangsfrequenz, der mit einer externen Steuerspannung erreichbar ist, beträgt 100 : 1. Selbstverständlich ist aber auch bei externer Frequenzeinstellung die Ausgangsfrequenz vom gerade angeschalteten Kondensator C_6–C_{11} abhängig (vgl. hierzu das Datenblatt im Abschnitt 3.3. Insgesamt sind mit der angegebenen Dimensionierung Frequenzen zwischen 0,02 Hz und 200 kHz einstellbar. Die Frequenz ändert sich linear mit der an Pin 8 anliegenden Steuerspannung, die Linearitätsabweichungen sind nach Angaben von Intersil geringer als 0,2%. Bei interner Frequenzeinstellung über R_{15} addiert sich zu diesem Fehler natürlich noch der Linearitätsfehler des Potentiometers. Dieser dürfte sich jedoch auch in annehmbaren Grenzen halten, so daß mit sehr guter Annäherung eine der Skalenteilung proportionale Frequenz erreicht wird. Die Diode D_1 soll den ICL 8038 vor positiver Überspannung schützen. Sowie eine extern angelegte Steuerspannung den Wert der positiven Versorgungsspannung plus 0,7 V (Schwellspannung der Diode) überschreitet, wird die Diode leitend.

Der gesamte Frequenzbereich läßt sich durch Abändern der Widerstände R_{10} und R_{11} erweitern. Verkleinert man R_{10} bzw. R_{11}, so wird die Frequenz angehoben, vergrößert man hingegen die beiden Programmierwiderstände, so kann man auch Frequenzen unter 0,02 Hz erreichen. Zwischen den Widerstandswerten von R_{10} und R_{11} und der Frequenz besteht allerdings kein linearer Zusammenhang. Bei Frequenzen über 200 kHz muß eine Verschlechterung der Kurvenform der Ausgangssignale in Kauf genommen werden. Das Verhältnis R_{10} : R_{11} bestimmt das Tastverhältnis. Bei einem Tastverhältnis 1 : 1 müssen demnach beide Widerstände denselben Wert haben. Durch unsymmetrische Dimensionierung kann das Tastverhältnis in weiten Grenzen variiert werden.

Die Widerstände R_{12} und R_{13} dienen zur Ausregelung der Oberwellenverzerrung des Sinus. Zum Abgleich genügt ein Oszilloskop. Man justiert die beiden Regler solange, bis auf dem Bildschirm eine optimale Sinuskurve erscheint. Bei völlig verdrehten Potis kann es auch vorkommen, daß am Sinusausgang (Pin 2) überhaupt kein Wechselsignal anliegt.

Der Kondensator C_{12} soll zusätzlich zur noch zu erläuternden Spannungsstabilisierungsschaltung evtl. Spannungseinbrüche auffangen, die durch das Umschalten des Rechteckausganges hervorgerufen werden können. Bei kurzmöglichsten Anschlußdrähten lötet man den Kondensator direkt an den entsprechenden Anschlußstiften des IC fest.

Der Rechteckausgang des ICL 8038 liegt am Pin 9, am Pin 3 liegt der Dreieckausgang und am Pin 2 kann die Sinusfunktion entnommen werden. Theoretisch könnte man diese Ausgänge über Buchsen aus dem Gerät herausführen und hätte damit bereits

ohne zusätzliches aktives Bauelement einen Funktionsgenerator. Dieser hätte aber dann den Nachteil, daß weder die Amplitude der Ausgangsfunktionen noch eine der Wechselspannung zu überlagernde Gleichkomponente (Offset) eingestellt werden könnte. Ein universell verwendbares Laborgerät sollte aber unbedingt über derartige Regelmöglichkeiten verfügen.

Da die Belastbarkeit der IC-Ausgänge relativ gering ist, wäre es nicht angebracht, die Ausgangsfunktionen über simple Abschwächer nach außen zu führen. Deshalb werden in der vorliegenden Schaltung die drei Ausgangsfunktionen mit einem Operationsverstärker (IC 4) verstärkt. Über den Stufenschalter St_{2b} wird wahlweise einer der drei Ausgänge mit dem Potentiometer R_{21} verbunden. Da die Amplituden der einzelnen Funktionen am Ausgang des Funktionsgenerator-Chips jedoch unterschiedlich sind, werden sie mit Hilfe der Widerstände R_{19} und R_{20} derart abgeschwächt, daß die am Widerstand R_{21} abfallende Spitze-Spitze-Spannung für alle drei Ausgangsfunktionen gleich ist. Da die Flankensteilheit der Rechteckfunktion stark von dem nach +Uv geschalteten Lastwiderstand abhängt, ist die zweite Ebene des Stufenschalters St_2 erforderlich. Je geringer der Lastwiderstand ist, desto schlechter wird die Flankensteilheit. Andererseits wird die Dreiecklinearität und die Oberwellenverzerrung des Sinus mit kleiner werdender Last besser. Wünscht man also eine gute Dreieck- bzw. Sinusfunktion, so darf der Rechteckausgang nur geringfügig belastet werden; um aber maximale Flankensteilheit des Rechtecks zu erlangen, muß der Rechteckausgang stärker belastet werden. Deshalb schaltet St_{2a} nur dann einen Lastwiderstand R_{14} an den Rechteckausgang des ICL 8038, wenn über St_{2b} das Rechtecksignal an R_{21} liegt.

Am Schleifer des Potentiometers R_{21} kann nunmehr ein beliebiger Bruchteil der über R_{21} abfallenden Spannung abgegriffen werden. Der Schleifer ist mit einem Eingang des als invertierender Summierer geschalteten Operationsverstärkers IC_4 verbunden. IC_4 verstärkt das Eingangssignal (= U_{e1}) um einen durch die Widerstände R_{23} und R_{25} festgelegten Faktor. Auf den anderen Eingang des Verstärkers wird eine mit R_{22} zwischen +Uv und −Uv einstellbare Gleichspannung (= U_{e2}) gegeben, die ebenfalls vom Operationsverstärker um einen nunmehr durch die Widerstände R_{24} und R_{25} festgelegten Faktor verstärkt bzw. abgeschwächt wird. Der Operationsverstärker addiert beide Signale und am Ausgang (Pin 6) fällt am Widerstand R_{26} eine Ausgangsspannung U_a ab, für die gilt:

$$U_a = -R_{25}\left(\frac{U_{e1}}{R_{23}} + \frac{U_{e2}}{R_{24}}\right)$$

Auf diese Weise ist es sehr einfach gelungen, die Amplitude der Wechselkomponente mit R_{21} konti-

nuierlich zu verändern und zudem der Ausgangsfunktion eine mit Hilfe des Potentiometers R_{22} einstellbare Gleichkomponente zu überlagern. Bei der angegebenen Dimensionierung dieses Bufferverstärkers beträgt die Ausgangsamplitude für alle drei Funktionen maximal 5,5 V und der Offset ist zwischen +6 V und −6 V einstellbar. Diese Werte wurden bei unbelastetem Ausgang gemessen. Die Wechselkomponente läßt sich selbst bei maximaler Amplitude mit Hilfe des Offsetreglers R_{22} komplett in den positiven oder negativen Bereich verschieben. Der Ausgangswiderstand des Generators ist relativ gering und beträgt ca. 100 Ω, unabhängig von der Stellung des Amplituden- oder Offsetreglers.
Selbst verständlich muß der Operationsverstärker das an R_{21} anliegende Wechselsignal ohne Verzerrungen übertragen. Für einen Sinus ist das bei einer max. Frequenz von 200 kHz noch recht unproblematisch; um bei einem Rechteck aber auch bei 200 kHz eine gute Flankensteilheit herauszuholen, bedarf es eines Breitband-Operationsverstärkers. Es wurde der Typ µA 715 gewählt, der zweifelsohne teuerer als ein Universal-Operationsverstärker, aber immer noch billiger als ein diskret aufgebauter gleichwertiger Bufferverstärker ist. Der µA 715 hat eine Bandbreite von 65 MHz und eine Anstiegsrate (slewing rate) von ca. 100 V/µsec. (vgl. Bild 31!).
Die Kondensatoren C_{13}, C_{14}, C_{15} dienen der Frequenzkompensation. Insbesondere C_{13} verschlechtert die Bandbreite der Verstärkeranordnung, ist aber unentbehrlich, um einen stabilen Betrieb des Verstärkers zu gewährleisten. C_{13} ist mit ca. 15 pF in der Stückliste angesetzt. Man kann mit dem Wert noch weiter heruntergehen und somit die Flankensteilheit des Rechteckes verbessern. Allerdings kann dann die Schaltung instabil werden und anfangen zu schwingen. Bei 15 pF ist ein stabiler Betrieb auch bei kapazitiver Last noch gewährleistet. R_{27} vergrößert den Ausgangswiderstand des Generators, er verhindert jedoch, daß insbesondere bei kapazitiver Last die Schaltung anfängt zu schwingen. Man kann auch R_{27} etwas variieren und versuchen, einen möglichst niedrigen Innenwiderstand bei gleichzeitig stabilem Betrieb zu erreichen.
Mit der angegebenen Dimensionierung der Kondensatoren C_{13}, C_{14} und C_{15} sowie der Widerstände R_{26} und R_{27} beträgt die Rechteck-Anstiegszeit (vgl. Bild 31) bei max. Amplitude ca. 200 nsec. Sie ist damit nicht sehr viel schlechter als die Anstiegszeit bzw. Abfallzeit der direkt am Ausgang des IC 3 anliegenden Rechteckfunktion.
Wie bereits im 1. Abschnitt des Kapitels 2.1. erläutert wurde, dient beim ICL 8038 die Rampenfunktion als Basisfunktion, von der Sinus und Rechteck abgeleitet werden. Einen zeitlinearen Spannungsanstieg zwischen den beiden Anschlüssen des Kondensators erreicht man aber nur dann, wenn in den Konden-

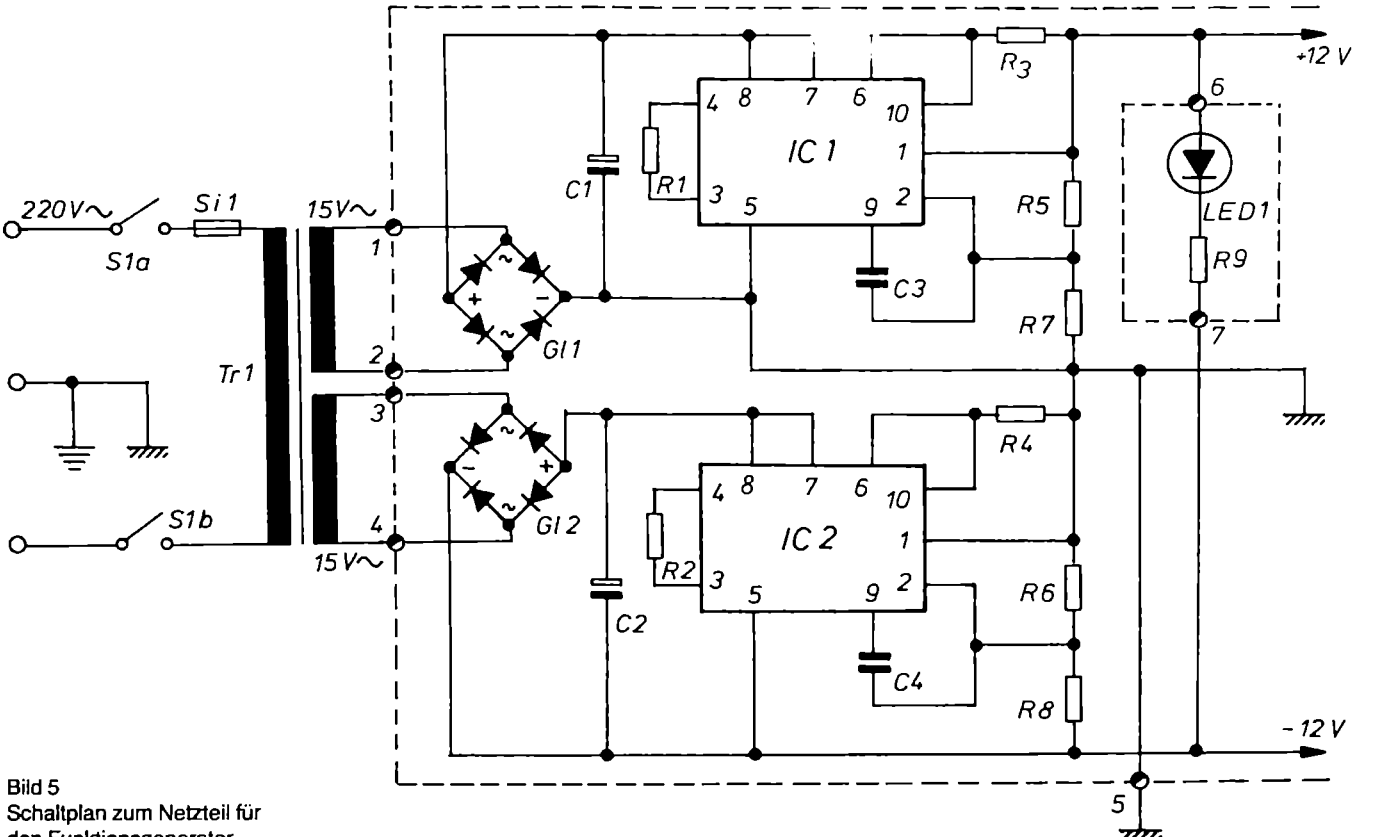


Bild 5
Schaltplan zum Netzteil für den Funktionsgenerator

sator Konstantstrom eingespeist wird, andernfalls steigt die Spannung am Kondensator nach einer Exponentialfunktion an. Zwar sind im IC Konstantstromquellen eingebaut (Stromquelle I und II), jedoch sind diese nicht in der Lage, die durch das Umschalten der Rechteckausgänge hervorgerufenen Spannungseinbrüche voll auszuregeln. Eine stabilisierte Spannungsversorgung der gesamten Schaltung ist deshalb unumgänglich.

Bild 5 stellt das erforderliche Netzteil dar. Da man die Ausgangsfunktionen des Generators sowohl in den positiven wie auch in den negativen Bereich verschieben möchte, ist eine symmetrische (+ −)-Versorgung erforderlich. Die an den Gleichrichtern Gl_1 und Gl_2

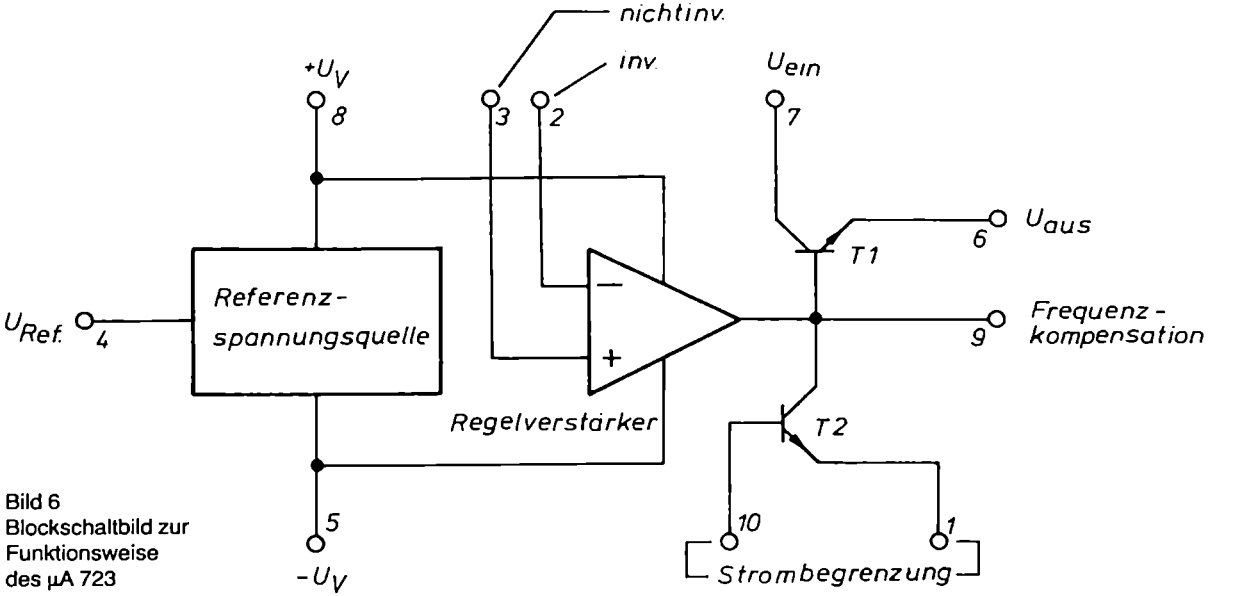


Bild 6
Blockschaltbild zur Funktionsweise des µA 723

anliegende pulsierende Gleichspannung wird mit Hilfe der groß dimensionierten Ladekondensatoren C_1 und C_2 ausreichend geglättet. Die Schaltkreise IC_1 und IC_2 sind integrierte Spannungsstabilisatoren, deren interne Verschaltung auf Bild 6 dargestellt ist. Ohne die Regelungsvorgänge im Einzelnen genau zu beschreiben, sei erläuternd gesagt, daß die ICs mit sehr geringer Zeitverzögerung einen durch plötzliche Lastveränderung hervorgerufenen Spannungsabfall ausregeln. Die Widerstände R_3 und R_4 begrenzen den maximalen Laststrom auf jeweils ca. 60 mA. Mit den Widerständen R_5 und R_7 bzw. R_6 und R_8 wird die Ausgangsspannung auf 12 V eingestellt, C_3 und C_4 dienen der Frequenzkompensation. IC_1 und IC_2 regeln jeweils getrennt die Ausgangsspannung auf 12 V. Beide Systeme wurden in Serie geschaltet, der Verbindungspunkt auf Masse gelegt.
Bei einer Frequenz von nahe 200 kHz sind die beiden Spannungsstabilisatoren nicht mehr in der Lage, die durch das Umschalten des Rechteckausgangs hervorgerufenen Spannungseinbrüche rechtzeitig auszuregeln. Das macht sich jedoch bei der Rechteck-Kurvenform kaum bemerkbar. Wenn St_2 auf Sinus oder Dreieck steht, ist der Lastwiderstand R_{14} über St_{2a} ohnehin weggeschaltet, und demzufolge wird die Versorgungsspannung auch weniger stark belastet. Deshalb sind bei Frequenzen nahe 200 kHz bei Sinus- und Dreieckfunktionen auch nur mit einem sehr empfindlichen Oszilloskop Spannungseinbrüche zu beobachten. Im Abschnitt 3. werden wir diesen Sachverhalt anhand von Oszillogrammen untersuchen (vgl. Bild 23, Bild 26 und Bild 29).

2.3. Der praktische Aufbau des Funktionsgenerators

Die gesamte Schaltung des Funktionsgenerators einschließlich des Netzteiles wurde auf einer einzigen Printplatte untergebracht. Alle Bauelemente, die sich auf der Printplatte befinden, sind auf den Schaltplänen Bild 4 und Bild 5 mit einer gestrichelten Linie umrandet. Verbindungsleitungen, die aus der Printplatte herausgeführt werden müssen, wurden durch ein ◔ gekennzeichnet und konsequent durchnumeriert.

Bild 7 zeigt die Printplatte im Maßstab 1 : 1 und auf Bild 8 ist der Bestückungsplan ebenfalls im Maßstab 1 : 1 abgebildet.

Für die Anfertigung der Printplatte aus foto-positiv beschichteten, kupferkaschierten Platten brauchen Sie eine seitenverkehrte Zeichnung, damit beim Kopieren Schicht auf Schicht gelegt werden kann, um Unterstrahlungen zu vermeiden. Diese Vorlage finden Sie im Anhang.

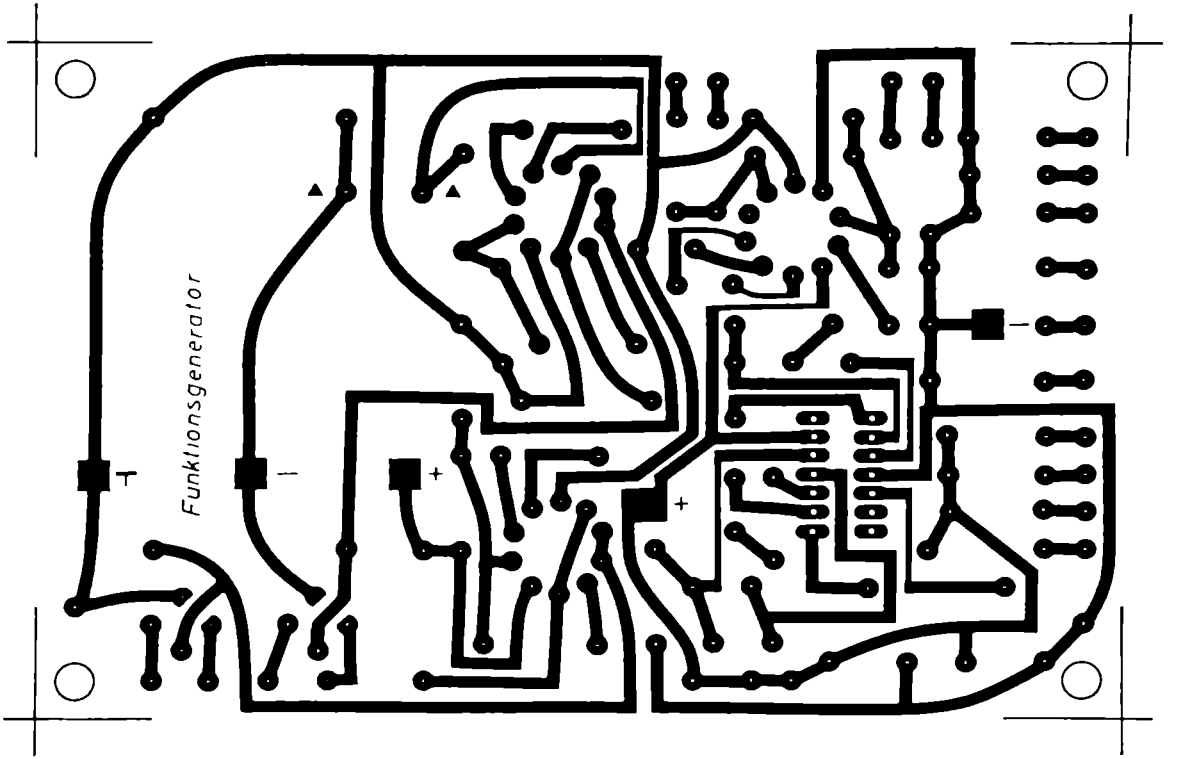


Bild 7 Printplatte zum Funktionsgenerator im Maßstab 1:1.
(Im Anhang als Reproduktionsvorlage zum Heraustrennen nochmals abgedruckt.)

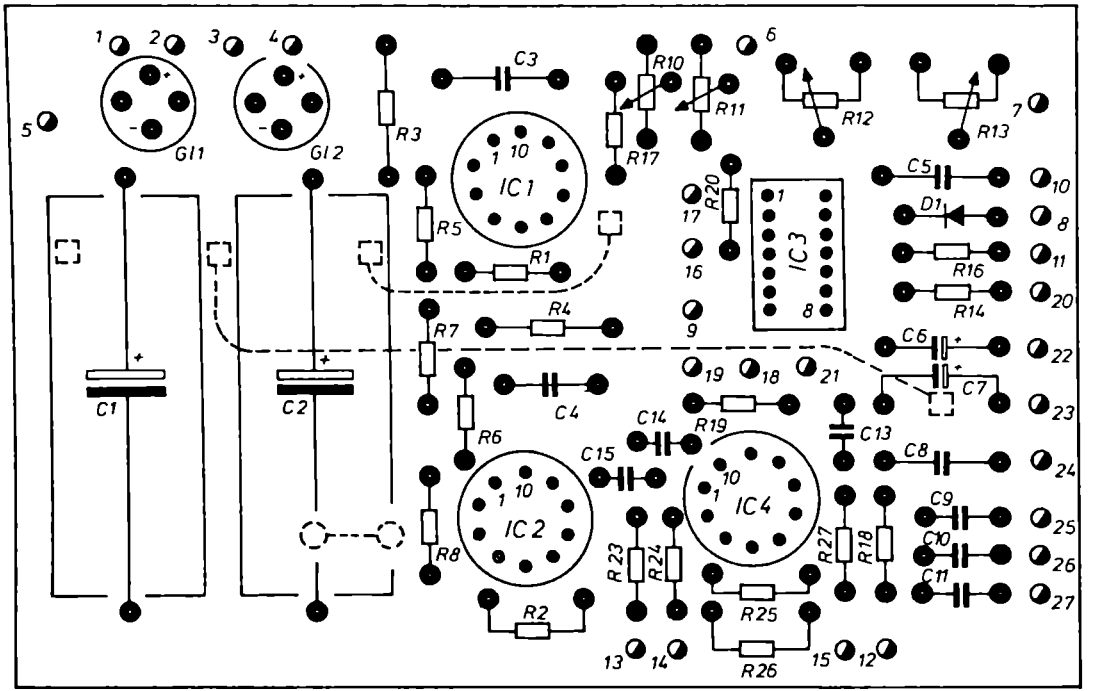


Bild 8 Bestückungsplan zum Funktionsgenerator

Wer den kompletten Bausatz bei der Firma Reuter Elektronik KG kauft, muß keine Printplatte selber herstellen. Der Bausatz enthält bereits die geätzte Printplatte, allerdings ungebohrt!
Auch auf dem Bestückungsplan Bild 8 wurden sämtliche Zuleitungen, die über Lötstifte aus der Platine herausgeführt werden sollen, durch ein ◔ gekennzeichnet und mit den zugehörigen Nummern aus dem Schaltplan versehen.
Die integrierten Schaltkreise im Metallgehäuse (IC 1, IC 2 und IC 4) werden ohne Sockel eingelötet. Man sollte deshalb die Anschlußdrähte nicht zu kurz abschneiden und nicht unnötig lange löten. Zwar sind

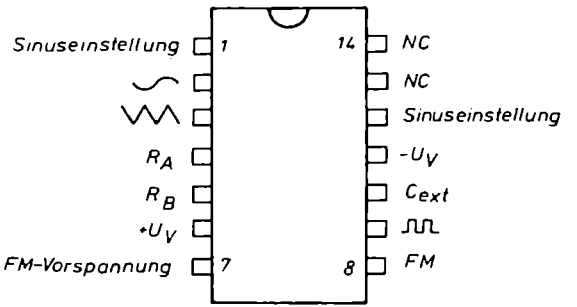


Bild 9 Anschlußbelegung des ICL 8038 (von oben gesehen)

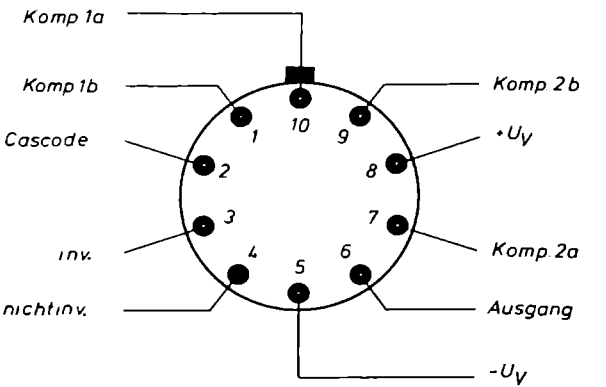


Bild 10 Anschlußbelegung des µA 715 (von oben gesehen)

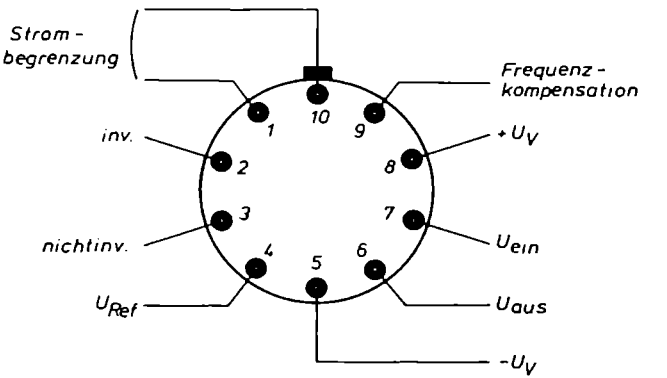


Bild 11 Anschlußbelegung des µA 723 (von oben gesehen)

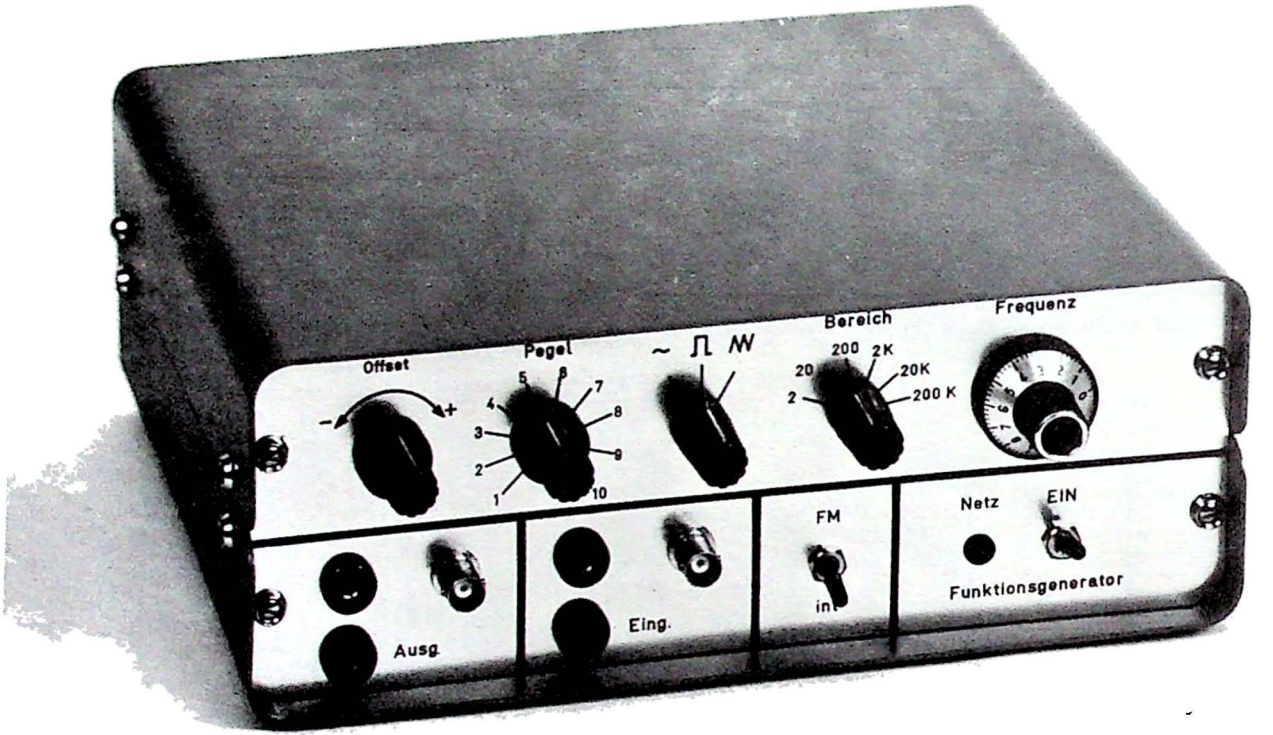


 Bild 12 Frontansicht des fertig montierten Funktionsgenerators

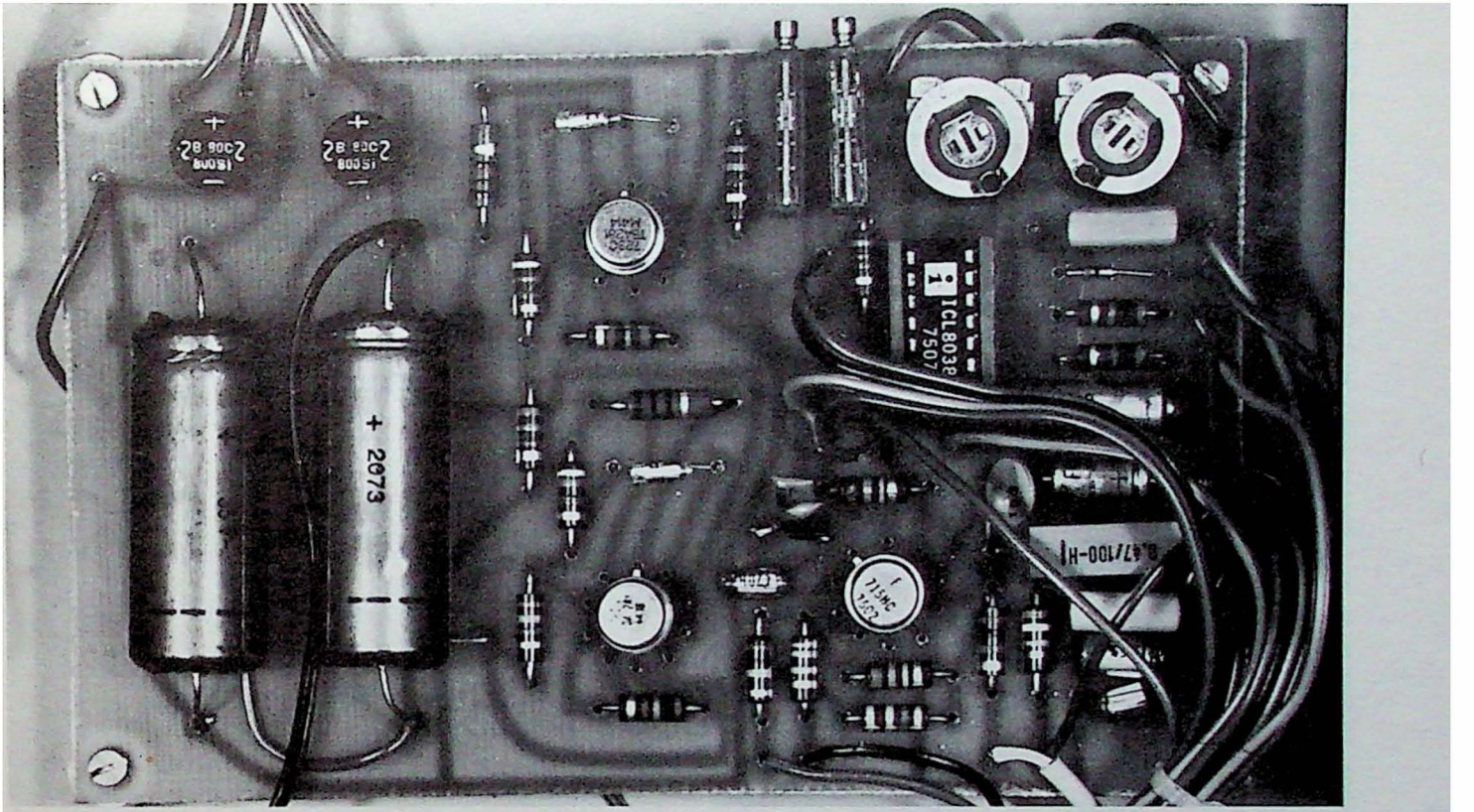


Bild 13 Bestückungsfoto zum Funktionsgenerator

die ICs gegen thermische Zerstörung einigermaßen unempfindlich, trotzdem vertragen sie Löttemperaturen von 300 °C nicht länger als 60 sec. IC 3 wird im DIL-Gehäuse geliefert und kann deshalb über einen 14poligen DIL-Sockel eingelötet werden.

Auf den Bildern 9, 10, 11 sind die Anschlußbelegungen verschiedener ICs angegeben. Es sei darauf hingewiesen, daß beim µA 715 der mit „Cascode" bezeichnete Anschluß offenbleibt. (Dieser wird zum Betrieb des µA 715 in einer Kaskadenverstärkerschaltung benötigt).

Der ICL 8038 kann während des Betriebes sehr heiß werden. Das ist normal und dadurch zu begründen, daß die interne Schaltung (vgl. Bild 1B) sehr viele Widerstände enthält, in denen elektrische Leistung in Wärme umgesetzt wird. Auch die beiden Spannungsstabilisatoren µA 723 können sich erwärmen, ein kleiner Kühlstern von 48 °C/W reicht zur Kühlung völlig aus. Im Falle eines Kurzschlusses wird der Strom durch die ICs begrenzt, so daß eine thermische Zerstörung ausgeschlossen ist. Der Operationsverstärker µA 715 hingegen darf sich nicht erwärmen, andernfalls ist etwas falsch verdrahtet.

Beim Bestücken der Platine dürfen drei, im Bestükkungsplan gestrichelt eingezeichnete Kabelbrücken nicht vergessen werden.

Der Kondensator C_{12} ist im Bestückungsplan nicht eingezeichnet, da er auf der Leiterseite der Printplatte zwischen den Anschlußstiften 6 und 11 eingelötet werden soll. Damit C_{12} Spannungseinbrüche einigermaßen auffangen kann, dürfen die Zuleitungen zum Kondensator nicht lang sein, damit entlang den Zuleitungskabeln kein Spannungsabfall entsteht.

Für die beiden Widerstände R_{10} und R_{11}, mit denen das Tastverhältnis bzw. die Frequenz einmalig festgestellt werden soll, verwendet man am besten 20-gängige Spindelpotentiometer. Man hat dann die Möglichkeit, die Widerstände sehr genau einzujustieren. Die Potentiometer können, falls man über keinen exakten Frequenzzähler verfügt, noch vor dem Einbau auf genau 3,19 kΩ getrimmt werden. Nur für diesen Wert stimmen die Skalenbeschriftungen und die Angaben in der Tabelle „Technische Daten"! Um ein Tastverhältnis von genau 1 : 1 zu erreichen, müssen beide Widerstände denselben Wert haben. Mit einer provisorischen Brückenschaltung kann man sie exakt abstimmen. Der einmal eingestellte Wert kann mit einem Lacktupfer festgehalten werden. Wer einen Frequenzzähler besitzt, der wird die Potentiometer natürlich erst nach Inbetriebnahme des Gerätes justieren. Um das Tastverhältnis 1 : 1 einzustellen, legt man zwischen die IC-Pins 3 und 4 ein sehr hochohmiges FET-Voltmeter und regelt mit R_{10} und R_{11} die Spannung zwischen Pin 3 und Pin 4 auf 0 Volt. Unter Umständen muß man nunmehr nochmals die Frequenz nachregeln.

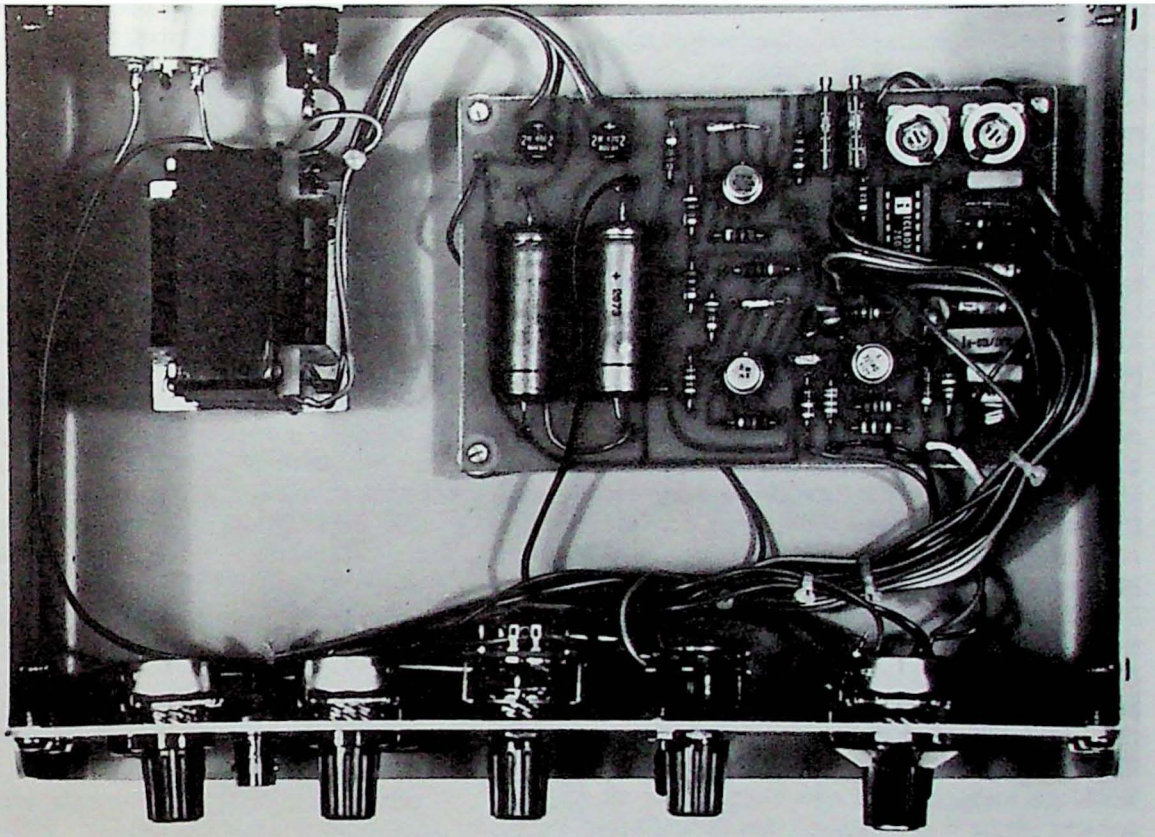


Bild 14
Blick in das Innere
des fertig montierten
Funktionsgenerators

Die Einstellung der Trimmer R_{12} und R_{13} ist weniger kritisch. Es genügen hier auch die viel billigeren Kohleschicht-Potentiometer, mit denen man den Sinus auf optimale Kurvenform abgleicht. Im nichtabgeglichenen Falle sind die Sinuskuppen zu spitz und der Verlauf ähnelt etwas der Dreieckfunktion, aus der der Sinus ja auch abgeleitet wird.

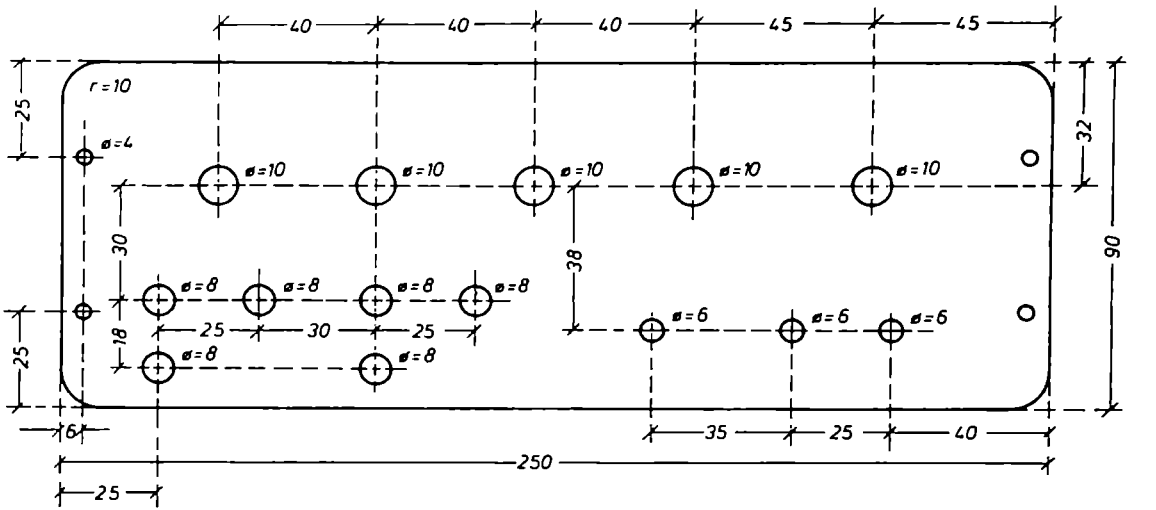
Die Printplatte wird zusammen mit dem Transformator in einem Gehäuse von 25 cm x 19 cm x 9 cm untergebracht, welches, wie Bild 12 zeigt, aus zwei U-förmigen Abdeckungen, einer Alu-Frontplatte, einer Alu-Rückseite und zwei seitlich angebrachten Stahl-Montageschienen besteht. Die Printplatte wird unter Zuhilfenahme von isolierenden Abstandsröllchen auf dem Gehäuseboden festgeschraubt, wobei darauf zu achten ist, daß Leiterbahnen auf der Printplatte nicht über die metallenen Befestigungsschrauben mit dem Chassis leitend verbunden werden. Eine Einbausicherung sowie der Kaltgerätestecker kann an der Gehäuserückseite festmontiert werden.

Bild 15 zeigt das Bohrschema für die Frontplatte, auf der sämtliche Bedienungsfunktionen gemäß Bild 16 übersichtlich untergebracht wurden. Bild 17 zeigt das Bohrschema für die Gehäuse-Rückwand. Die Bilder 15, 16 und 17 wurden im Maßstab 1 : 2 hier abgedruckt. Sie finden diese Pläne nochmals im Anhang auf Seite 56/57 im Maßstab 1 : 1 zum Heraustrennen, so daß anhand dieser 1 : 1-Vorlagen das Bohrschema leicht auf die Frontplatte übertragen werden kann. Anhand des Frontplattenentwurfs Bild 16 kann man sich nach dem Scotch-Colour-Key-Verfahren eine Alu-Frontplatten-Beschriftungstafel auf fotografischem Wege herstellen. Wer sich natürlich zum Kauf des kompletten Bausatzes für den Funktionsgenerator entschließt, muß sich nicht mit der Montage des Gehäuses herumplagen. Dem Bausatz liegt ein fertig gebohrtes Gehäuse und eine sauber geprägte Frontplatte und Rückwand bei.

Auf der Frontplatte müssen zwei Stufenschalter zur Funktionswahl bzw. zur Bereichseinstellung und 3 Potentiometer für Pegel, Offset und Frequenzfeineinstellung untergebracht werden, zudem zwei BNC-Buchsen für den Funktionsausgang und den FM-Eingang, vier 4-mm-Buchsen, ein Umschalter für interne bzw. externe FM-Vorspannung, ein Netzschalter und eine Leuchtdiode als Spannungskontrolle. An den 4-mm-Buchsen wird nochmals, um allen Steckersystemen gerecht zu werden, der Funktionsausgang sowie der FM-Eingang angeschlossen, zudem liegen 2 Buchsen auf Massepotential.

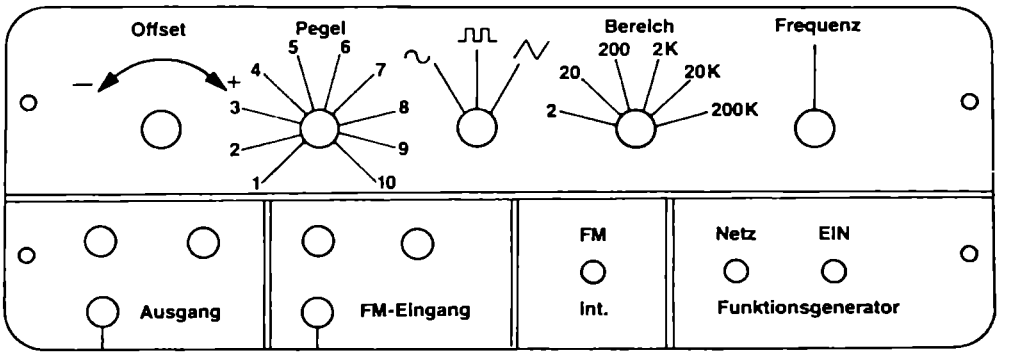
Da bei der Verdrahtung eines Selbstbaugerätes erfahrungsgemäß die meisten Fehler unterlaufen, liegen dieser Bauanleitung zwei Verdrahtungs-Abstreichpläne bei (Bild 18 und Bild 19). die im Anhang Seite 67–69 nochmals größer zum Heraustrennen abgedruckt wurden. Auf diesen Plänen wurden sämt-

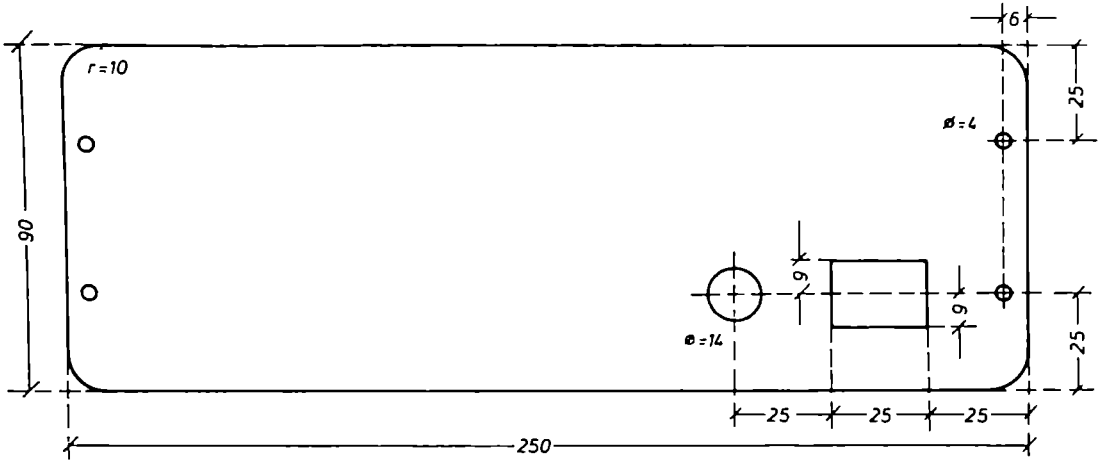
Bild 15
Bohrschema zur Frontplatte zum Funktionsgenerator. (Dieses Bohrschema wurde im Anhang nochmals im Maßstab 1:1 zum Heraustrennen abgedruckt.)



Maße in mm

Bild 16
Vorlage zur Frontplattenbeschriftung für den Funktionsgenerator. (Diese Vorlage wurde im Anhang nochmals im Maßstab 1:1 zu Reproduktionszwecken zum Heraustrennen abgedruckt.)





Maße in mm

Bild 17 Bohrschema zur Gehäuserückwand. (Dieses Bohrschema wurde im Anhang, Seite 57, nochmals im Maßstab 1:1 zum Heraustrennen abgedruckt.)

liche Anschlüsse auf der Printplatte eingezeichnet und alle noch zusätzlich anzuschließenden Bauteile. Jede einzelne Verbindungsleitung wurde durch ein **O** gekennzeichnet. Wenn man konsequent nach jeder eingelöteten Leitung in das zugehörige Kreischen ein Kreuz macht, kann auch bei der Verdrahtung nichts mehr schief gehen. Die Buchsen B 3 und B 4 verbindet man zweckmäßigerweise mit einem abgeschirmten Kabel mit der Printplatte, die Masseleitungen an den beiden BNC-Buchsen sowie an den 4-mm-Buchsen B_5 und B_6 sollten möglichst kurz sein und mit dem Chassis verbunden werden. Der Schutzkontakt SK muß natürlich mit dem Gehäuse verbunden werden.

Im Anhang sind Abstreichlisten zum schrittweisen Zusammenbau des Gerätes wiedergegeben. Wird dort jeder Arbeitsgang nach seiner Ausführung gleich abgestrichen, erhält man eine zusätzliche Kontrolle. Es kann nichts übersehen oder vergessen werden.

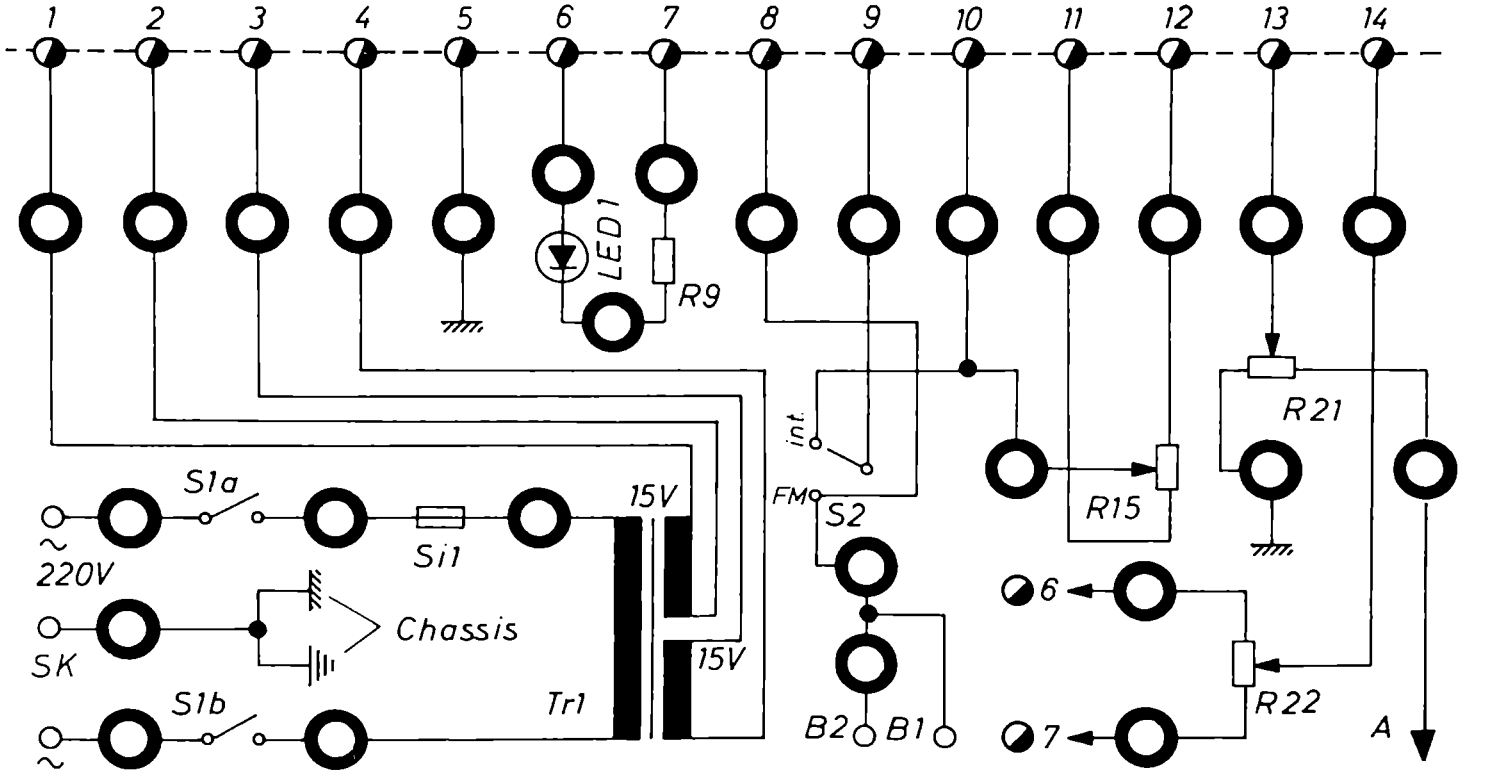
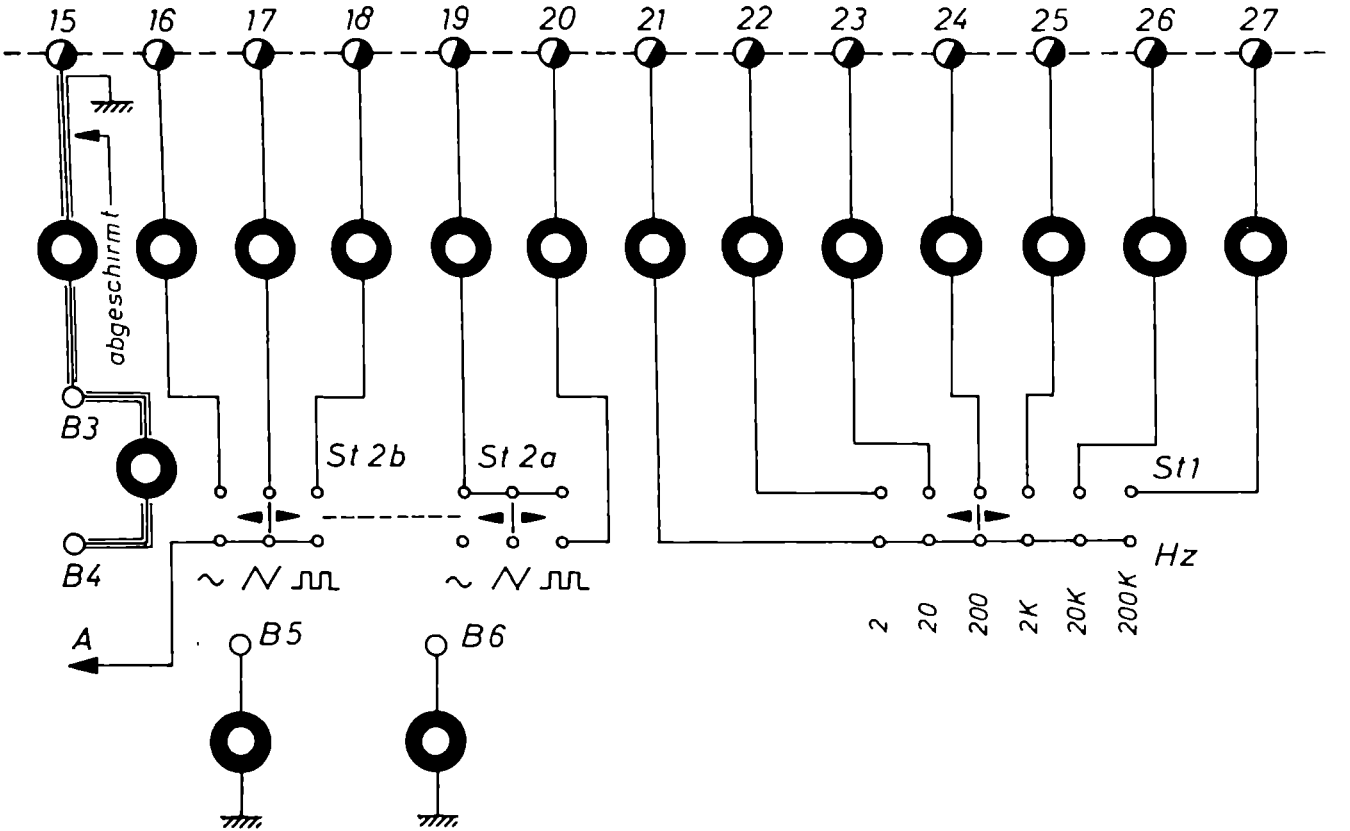


Bild 18 Verdrahtungs-Abstreichplan I



Verdrahtungs-Abstreichplan II. (Beide Verdrahtungs-Abstreichpläne, Bild 18/19, wurden im Anhang nochmals zum Heraustrennen abgedruckt.)

Stückliste zum Funktionsgenerator

Widerstände:

R 1 = R 2 = 2,7 kΩ
R 3 = R 4 = 6,8 Ω/0,5 Watt
R 5 = R 6 = 4,7 kΩ
R 7 = R 8 = 6,8 kΩ
R 9 = 1,2 kΩ
R 10 = R 11 = 10 kΩ, lin.,
(Spindelpotentiometer (Cermet) 20gängig
R 12 = R 13 = 100 kΩ, lin.,
Kohleschicht-Trimmpotentiometer für
Horizontalmontage auf Printplatten
dazu: 2 Abdeckplättchen
R 14 = R 16 = 1 kΩ
R 15 = R 21 = R 22 = 10 kΩ, lin.,
Potentiometer 0,2 Watt
dazu: 2 Meßgeräteknöpfe (ELMA) und ein Meßgeräteknopf mit eingebauter Skala (1–10)
R 17 = 6,8 MΩ
R 18 = 39 kΩ
R 19 = R 25 = 18 kΩ
R 20 = 8,2 kΩ
R 23 = 10 kΩ
R 24 = 33 kΩ
R 26 = 3,3 kΩ
R 27 = 100 Ω

Alle Widerstände (mit Ausnahme R_3 und R_4) sind Kohleschichtwiderstände) mit einer Belastbarkeit von 1/4 Watt.

Kondensatoren:

C 1 = C 2 = 1000 µF/25 V
C 3 = C 4 = 220 pF
C 5 = 0,22 µF
C 6 = C 12 = 47 µF/25 V
C 7 = 4,7 µF/25 V
C 8 = 0,47 µF
C 9 = 0,047 µF
C 10 = 4,7 nF
C 11 = 470 pF
C 13 = 15 pF, keramisch
C 14 = 180 pF, keramisch
C 15 = 470 pF

Halbleiter:

IC 1 = µA 723 (Fairchild) } Metallgehäuse
IC 2 = µA 723 (Fairchild) }
IC 3 = ICL 8038 (Intersil) DIL-Gehäuse
dazu: 14poliger DIL-Sockel
IC 4 = µA 715 (Fairchild) Metallgehäuse
LED1 = RL 4484 (Litronix) oder andere Universal-Leuchtdiode
dazu: 1 passende LED-Fassung
D 1 = 1 N 914 = BAY 61 oder 1 N 4148
Gl 1 = Gl 2 = B 40 C 800 Si oder B 60 C 800 Si

Trafo:
Tr 1 = Trafo: Primärseite · 220 V
Sekundärseite: 2 x 15 V, 300 mA

Montagematerial:
S 1 = Miniatur-Kippschalter, 2 x Ein
S 2 = Miniatur-Kippschalter, 1 x Um
St 1 = Stufenschalter 1 x 6, Stellwinkel: 30°
dazu: 1 Meßgeräteknopf (ELMA)
St 2 = Stufenschalter 2 x 3, Stellwinkel: 30°
dazu: 1 Meßgeräteknopf (ELMA)
Si 1 = Sicherung 0,1 A, träge
dazu: 1 Einbau-Sicherungshalter für Frontplattenmontage
B 1 = B 2 = BNC-Buchse mit Gewinde zur Frontplattenmontage
B 3 = B 4 = B 5 = B 6 = Buchse 4 mm 2 x rot
1 Printplatte, geätzt (vgl. Bild 7) 2 x schwarz
1 Frontplatte, beschriftet (vgl. Bild 16 und Bild 17)
1 Gehäuse-Rückwand (vgl. Bild 18)
2 U-förmige Abdeckhauben
2 Stahlblech-Montageschienen
1 Kaltgeräte-Steckbuchse für Frontplattenmontage
Bandkabel
Lötstifte
Lötösen
Blechschrauben
metrische Schrauben

3. Funktionsgenerator – Meßpraxis

3.1. Technische Daten und Oszillogramme zum Funktionsgenerator

In diesem Abschnitt sollen anhand von insgesamt 10 Oszillogrammen die Ausgangsfunktionen des Funktionsgenerators untersucht werden. Dadurch werden sowohl die Möglichkeiten des Gerätes, als auch die Grenzen der Anwendung deutlich.
Sämtliche Oszillogramme wurden mit einem Oszilloskop mit einer Bandbreite von 8 MHz (–3dB), einer Anstiegszeit von ca. 30 nsec und einer Eingangsreaktanz von R_L = 1MΩ/C_L = 30 pF aufgenommen. Bei Darstellung von 2 Kurvenzügen gleichzeitig wurde das Oszilloskop grundsätzlich im Chopperbetrieb betrieben, da nur dann – im Gegensatz zur „alternierenden" Betriebsweise – eine exakte zeitliche Zuordnung der Kurvenzüge zueinander möglich ist. Die Chopperfrequenz wurde mit f_{CH} abgekürzt.
Auf den Seiten 43 bis 46 wurden in Form einer Übersicht wichtige Begriffe und Größen, die zur Beschreibung von Rechteck-, Dreieck- und Sinusschwingungen unentbehrlich sind, zusammengestellt. Auf diese Übersicht wird in den folgenden Oszillogramm-Diskussionen Bezug genommen. Die „Definitionen zur Rechteck-, Dreieck- und Sinusfunktion" enthalten auch 5 detaillierte Bilder der 3 Funktionen, in die die

wichtigsten Größen und Definitionen eingezeichnet wurden. Es erübrigt sich ein zusätzlicher Kommentar. Weiterhin wurden die wichtigsten technischen Daten des Funktionsgenerators nach Auswertung der 10 Oszillogramme auf den Seiten 47 bis 48 zusammengefaßt. Für einige schwer vorzunehmende Messungen wurden Angaben aus dem Intersil-Datenblatt zum ISL 8038 übernommen. Diese Angaben sind jedoch besonders gekennzeichnet.

Bild 20:
Dieses Bild zeigt die Rechteckfunktion bei einer Frequenz von f = 1,5 kHz; die Amplitude beläuft sich auf ca. Û = 2 V. Eine Offsetspannung wurde nicht eingestellt, mithin gilt U- = 0 V. Die Länge der vom Oszilloskop geschriebenen Zeitlinie (= t_{zL}) beträgt ca. t_{zL} = 1,2 msec., d. h., der Elektronenstrahl läuft in ca. 1,2 msec vom linken zum rechten Bildrand der Strahlröhre. Der Y-Eingang des Oszilloskops wurde mit dem regulären Funktionenausgang des Funktionsgenerators, also mit Buchse B 3 (vgl. Bild 4), verbunden. Wie aus dem Foto zu ersehen ist, beträgt das Tastverhältnis ca. T- : T+ = 1 : 1, eine Dachschräge D ist nicht erkennbar. Bei den abfallenden Flanken ist unten ein geringfügiges Überschwingen sichtbar, bei der ansteigenden Flanke in der Bildmitte scheint der Einschwingvorgang in Form einer sich nach oben hin verbreiternden Flanke gerade noch erkennbar.

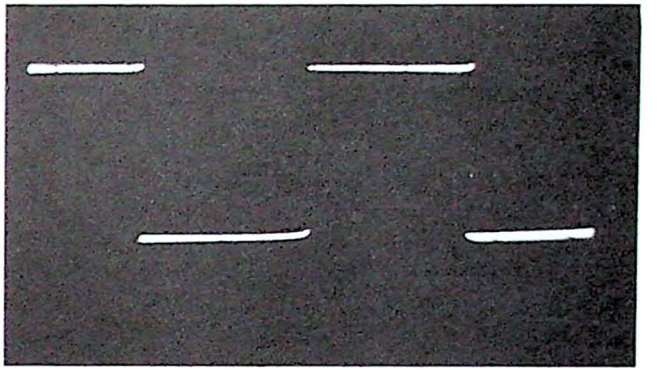


Bild 20

Bild 21:
Um die abfallende Flanke genauer untersuchen zu können, wurde die Zeitlinie mit Hilfe einer 2. Zeitbasis auf die 480-fache Länge gedehnt, so daß nunmehr t_{zL} = 2,5 µsec beträgt, die Amplitude wurde auf Û = 4 V erhöht, der Offset wurde mit U- = 0 V beibehalten.
Nunmehr können der Einschwingvorgang t_s bei der abfallenden Flanke, das Überschwingen ü, sowie die Flankensteilheit τ sehr gut beurteilt werden.
Unter Zugrundelegung der in der Übersicht „Definitionen zur Rechteck-, Dreieck- und Sinusfunktion" (Abschnitt 3.2.) angegebenen Definition der Flankenanstiegszeit bzw. Flankenabfallzeit τ stellt man einen

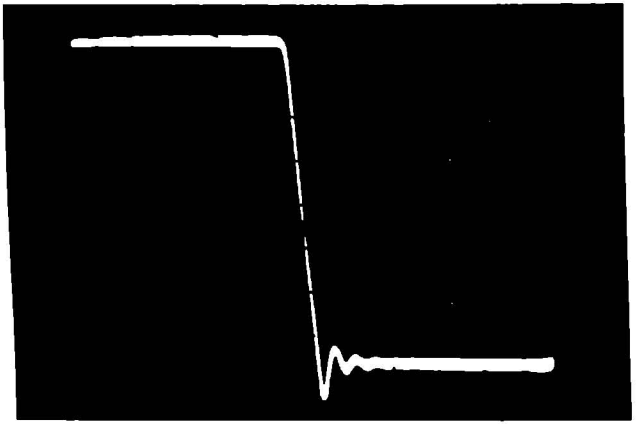


Bild 21

Wert von τ = 130 nsec fest. Dies ist gleichbedeutend mit einer Anstiegsrate bzw. hier besser Abfallrate von

$$\frac{\Delta U(t)}{\Delta t} = \frac{0{,}8\,\hat{U}}{\tau} = \frac{0{,}8 \cdot 4\ V}{130\ nsec} = 24{,}6\ V/\mu sec$$

d. h. pro 1 µsec ändert sich die Spannung um ca. 24,6 V. Bei max. Pegel, also bei $\hat{U}$ = 5,5 V (vgl. Datenblatt 3.3.) würde demzufolge die Abfallzeit bei τ = 178 nsec liegen. τ ist, wie bereits auf Seite 17 erläutert wurde, in sehr großem Maße von der Dimensionierung des Kondensators C_{13} (vgl. Bild 4) abhängig. Je kleiner C_{13} ist, desto besser wird die Flankensteilheit. Andererseits kann C_{13} nicht beliebig verkleinert werden, da dann der Operationsverstärker µA 715 (IC_4) instabil wird. Bei den hier vorgenommenen Messungen wurde C_{13} = 15 pF gewählt, wie auch in der Stückliste angegeben wurde. Im allgemeinen wird man bei max. Pegel $\hat{U}$ = 5,5 V sicher mit $\tau < 200$ nsec bzw.

$$\frac{\Delta U(t)}{\Delta t} > 22\ V/\mu sec$$

rechnen können.

Mit dem schnellen Operationsverstärker µA 715 sind laut Fairchild-Datenblatt Anstiegsraten von bis zu

$$\left(\frac{\Delta U(t)}{\Delta t}\right)_{max} = 100\ V/\mu sec$$

möglich; bei der vorliegenden Schaltung wurden aus dem obengenannten Grund und natürlich wegen der geringeren Anstiegsrate des ICL 8038 nur etwa 25 V/µsec erreicht. Dennoch ist dies für den Bereich der Hobby-Elektronik ein guter Wert; der allgemein bekannte Operationsverstärker µA 741 weist z. B. nur eine Anstiegsrate von

$$\frac{\Delta U(t)}{\Delta t} = 0{,}5\ V/\mu sec \text{ auf.}$$

Mit einer Flankenabfallzeit von τ = 160 nsec bei ca. $\hat{U}$ = 5 V (→TTL-H-Pegel) kann der Funktionsgenerator auch im Bereich der Digitalelektronik (TTL und MOS) eingesetzt werden. Dort wird nämlich von den IC-

Herstellern eine max. Flankenabfallzeit τ_{max} vorgeschrieben, welche nicht überschritten werden darf, um eine einwandfreie HL-Flankentriggerung der verschiedenen Schaltglieder zu gewährleisten. Der Wert für τ_{max} liegt mit Ausnahme einiger Spezialbauelemente für fast alle gängigen ICs über 200 nsec. Dasselbe gilt für die LH-Flankentriggerung. Auch dann schaltet der Rechteckausgang noch schnell genug, wie wir aus Bild 22 noch ersehen werden.
An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß für die Anwendung des Funktionsgenerators im Bereich der Digitalelektronik die stufenlose Offsetregelung von außerordentlich großem Nutzen ist. Mit dem Offsetregler ist es, wie bereits im Rahmen der Schaltungsbeschreibung erläutert wurde, möglich, die Ausgangsfunktionen komplett in den positiven oder negativen Spannungsbereich zu verschieben, so daß das Gerät pegelmäßig an die TTL-Logik-Serie SN 7400 bzw. die CMOS-Logik CD 4000 (RCA) und MM 74 C 00 (National Semiconductor) angepaßt werden kann. Die meisten handelsüblichen NF-Generatoren verfügen nämlich nicht über eine derartige Offseteinstellung!
Weiterhin kann aus dem Foto Bild 21 die Einschwingzeit t_s ermittelt werden. Es ergibt sich ein Wert von ca. $t_s = 300$ nsec. Bei einer Frequenz von $f = 1$ kHz und demzufolge einer negativen Pulslänge $T_- = 500$ µsec macht das ca. 0,06% der Pulslänge aus, bei $f = 100$ kHz hingegen sind es schon 6,0% der Pulslänge. Die Einschwingzeit t_s ist geringfügig von der Stellung des Offsetreglers, also von der Spannung U_- abhängig. Außerdem ist t_s von der Flankensteilheit abhängig. Je besser die Flankensteilheit ist, je kleiner also C_{13} gemacht wird, desto größer wird t_s. Man muß abwägen, ob man mehr Wert auf Flankensteilheit oder auf geringere Einschwingzeit legt. Im allgemeinen sind $t_s = 300$ nsec nicht störend.
Auch das Überschwingen ü hängt von τ bzw. von C_{13} und geringfügig auch von der Stellung des Offsetreglers ab. Für $U_- = 0$ V wurde für die abfallende Flanke ein Wert von ü = 10% ermittelt. Falls sich dies im Rahmen eines Versuchsaufbaues störend auswirken sollte, bleibt nichts anderes übrig, als C_{13} zu vergrößern und damit eine schlechtere Flankensteilheit in Kauf zu nehmen.

Bild 22:
Dieses Bild zeigt die ansteigende Flanke der Rechteckfunktion. Die Einstellungen am Funktionsgenerator und am Oszilloskop wurden gegenüber den Einstellungen von Bild 21 nicht verändert. Die Amplitude beträgt $\hat{U} = 4$ V, der Offset $U_- = 0$ V, die Länge der Zeitlinie $t_{zL} = 2{,}5$ µsec.
Für die Flankenanstiegszeit τ ergibt sich genau derselbe Wert wie für die Flankenabfallzeit in Bild 21,

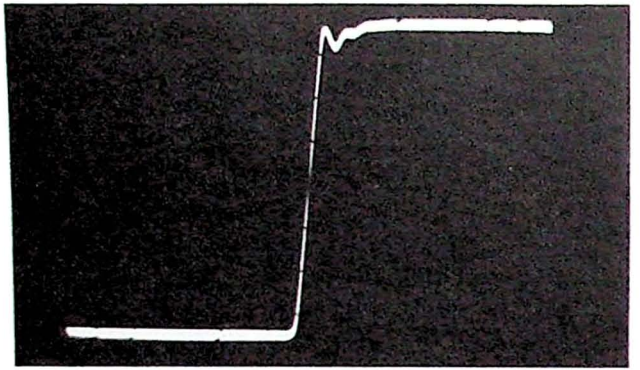


Bild 22

nämlich $\tau = 130$ nsec. Die entspricht wiederum einer Anstiegsrate von ca.

$$\frac{\Delta U(t)}{\Delta t} = 24{,}6\ \text{V}/\mu\text{sec}.$$

Bei max. Pegel $\hat{U} = 5{,}5$ V würde sich demnach für die Anstiegszeit wie auch für die Abfallzeit ein Wert von ca. $\tau = 178$ nsec ergeben. Damit kann der Funktionsgenerator auch im Rahmen von Digital-Experimenten für LH-Flankentriggerung angewandt werden, wie bereits oben erwähnt wurde.

Die ansteigende Flanke schwingt bei $U_- = 0$ V nicht über, mithin gilt $\ddot{u} = 0\%$. Je nach Stellung des Offsetreglers kann gegebenenfalls ein geringfügiges Überschwingen beobachtet werden, das jedoch wesentlich unter $\ddot{u} = 10\%$ bleibt.
Die Einschwingzeit t_s bei der ansteigenden Flanke ist ebenfalls geringer als t_s bei der abfallenden Flanke und beläuft sich auf ca. $t_s = 200$ nsec.

Bild 23:
Dieses Bild gibt Aufschluß über das Verhalten der beiden Spannungsstabilisatoren µA 723 (IC_1 und IC_2) beim Umschalten des Rechteckausganges. Auf dem oberen Teil des Bildes wurde die Rechteckfunktion (abgegriffen an B 3) oszillografiert. Die Frequenz beträgt $f = 200$ kHz, die Amplitude $\hat{U} = 5$ V, der Offset $U_- = 0$ V. Auf dem unteren Teil des Bildschirms wurde die der positiven Versorgungsspannung + U_V überlagerte Wechselkomponente dargestellt, welche am Pin 6 des ICL 8038 (vgl. Bild 4) abgegriffen wurde. Die Länge der Zeitlinie beträgt $t_{ZL} = 7$ µsec, die Chopperfrequenz $f_{CH} = 80$ Hz.
Man erkennt deutlich, daß im Moment des Umschaltens des Rechteckausganges die konstante Versorgungsspannung aufgrund der schnellen Laständerung kurzzeitig einbricht. Die Spannungsstabilisatoren sind nicht in der Lage, eine so schnelle Stromänderung richtig auszuregeln. Die Regelung wird instabil und

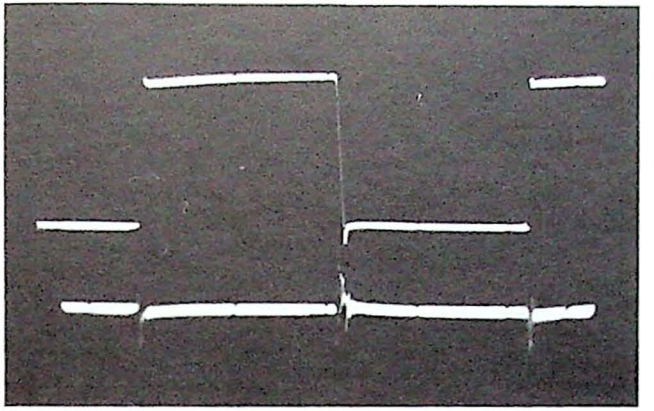


Bild 23

gerät ins Schwingen, was an den hochfrequenten Spannungsspitzen zu erkennen ist. Die Amplitude dieser Spannungsspitzen beläuft sich auf ca. 30 mV (ein Größenvergleich auf dem Foto mit der Amplitude der Rechteckschwingung ist nicht möglich, da diese natürlich sehr viel stärker abgeschwächt wurde). Durch Umdimensionierung der Frequenzkompensationskondensatoren C_3 und C_4 (vgl. Bild 5) könnte die Spannungsregelung langsamer bzw. noch schneller, damit aber instabil gemacht werden. Ein völliges Ausregeln der Spannungsspitzen ist mit der beschriebenen einfachen Stabilisierungsschaltung nicht möglich.

Jedoch sind gerade diese Spannungsspitzen mitverantwortlich für das Überschwingen ü und die Einschwingzeit t_s. Gelänge es, die Spannungsregelung zu verbessern, so wären wesentlich bessere Werte für ü und t_s möglich. Allerdings steht der Kostenaufwand für ein besseres Netzteil in keinem vernünftigen Verhältnis zu der dadurch erreichten Verbesserung bzw. zu der recht einfachen Funktionsgeneratorschaltung.

Bild 24:

Hier wird die Dreieckfunktion gezeigt. Die Frequenz beträgt ca. $f = 2$ kHz, die Amplitude $\hat{U} = 4$ V, der Offset $U_{=} = 0$ V. Der Y-Verstärker des Oszilloskops wurde an den regulären Funktionenausgang Buchse B 3 (vgl. Bild 4) angeschlossen. Die Länge der Zeitlinie beläuft sich auf ca. $t_{zL} = 1{,}5$ msec.

Das Tastverhältnis beträgt $T_- : T_+ = 1 : 1$, wie aus dem Foto hervorgeht. Eine Aussage über die Linearität des Rampenanstiegs bzw. Rampenabfalls anhand eines Oszillogramms ist nicht möglich. Nach Angaben von Intersil ist beim ICL 8038 die Linearitätsabweichung $l < 1\%$; bei den meisten erschwinglichen Hobby-Oszilloskopen jedoch ist der Linearitätsfehler der Kippspannung größer als 1%, so daß schon aus diesem

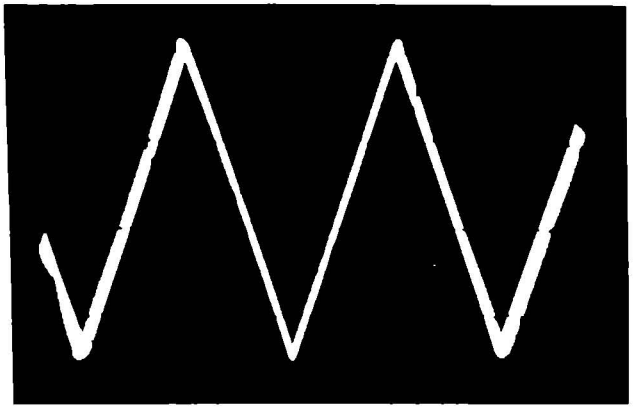


Bild 24

Grunde eine Messung unsinnig wäre. Es bleibt also zu hoffen, daß die Angaben im Datenblatt zum ICL 8038 richtig sind; eigene Messungen erfordern teure Meßgeräte.

Bild 25:
Auf diesem Bild wird die zeitliche Zuordnung von Dreieck- und Rechteckfunktion deutlich. Diesmal wurde die Spannung direkt an den IC-Pins 3 (⩘) und 9 (⎍) abgegriffen, die Frequenz beträgt f = 2 kHz und die Amplituden $\hat{U}_{\wedge} = 7{,}5$ V und $\hat{U}_{\sqcap} = 22$ V. Die Länge der Zeitlinie beläuft sich auf $t_{ZL} = 1{,}8$ msec, als Chopperfrequenz wurde $f_{CH} = 80$ kHz gewählt.

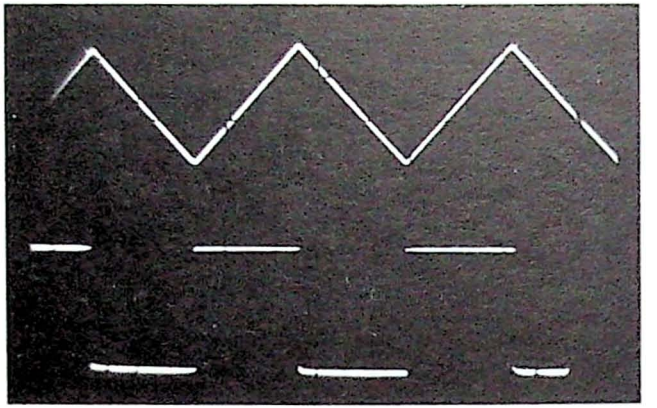


Bild 25

Anhand dieses Bildes findet man die nur theoretischen Erläuterungen des Abschnittes 2.1. zur Funktionsweise des ICL 8038 bestätigt. Der Verlauf der am Pin 9 abgegriffenen Rechteckspannung unterscheidet sich nur um einen konstanten Faktor von den beiden Konstantströmen I_1 und $(\lambda - 1)\, I_1$. Die Dreieckfunktion ergibt sich aus dem Integral über die Konstantströme, wobei gemäß den ausführlichen Erläuterungen auf Seite 7 für die positive Rampe die Gleichung.

$$U_C = 1/C \int I_1 \, dt$$

gilt, für die negative Rampe folgt entsprechend

$$U_C = -1/C \int (\lambda - 1)\, I_1 \, dt.$$

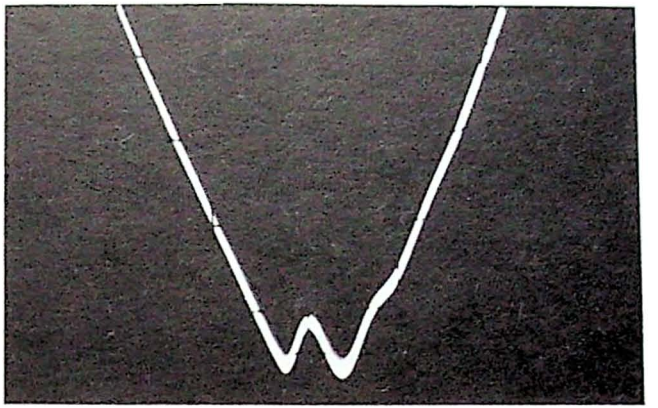


Bild 26

Bild 26:
Wenn man anhand einer 2. Zeitbasis eine Dreieckspitze der auf Bild 24 dargestellten Dreieckfunktion vergrößert, erkennt man sehr gut den Einfluß der starken Belastung der Spannungsstabilisatoren zum Zeitpunkt des Umschaltens der Rechteckfunktion auf die Dreieckfunktion.
Am Generator wurde eine Frequenz von f = 2 kHz eingestellt, eine Amplitude von $\hat{U} = 4$ V, der Offset betrug $U_{-} = +4$ V. Der Empfindlichkeitsteiler am Oszilloskop wurde auf 0,1 V/cm eingestellt, so daß eine untere Dreieckspitze sehr stark vergrößert auf dem Bildschirm erschien. Die Länge der Zeitlinie beträgt $t_{ZL} = 1{,}8$ µsec, das Signal wurde an Buchse B 3 abgegriffen.
Auf dem Foto erkennt man, daß sich keine einwandfreie Dreieckspitze ausbildet. Im Moment des Umschaltens des Rechteckausganges (vgl. hierzu Bild 25) bricht die Dreieckspannung für die Dauer von ca. 360 nsec. leicht ein (ca. 50 mV). Dies entspricht in etwa der Zeit $\tau + t_s$ der positiven Flanke des Rechteckes von Bild 22. Es wurden dort für τ und t_s folgende Werte ermittelt: $\tau = 130$ nsec, $t_s = 200$ nsec.
Durch diesen Versuch wird deutlich, daß das Umschalten des Rechteckausganges trotz Wegschalten des Lastwiderstandes R_{14} (vgl. Bild 3 und Abschnitt 2.2 Seite 13) nicht ganz ohne Einfluß auf die Kurvenform des Dreiecks bleibt. Allerdings macht sich diese etwas unsaubere Dreieckspitze im allgemeinen nicht bemerkbar, es sei denn, man arbeitet mit sehr kleiner Pegeleinstellung $\hat{U}$.

Bild 27:
Bild 27 zeigt die Sinusfunktion bei einer Frequenz von ca. f = 2 kHz, die Amplitude beträgt $\hat{U} = 4$ V, ein Offset wurde nicht eingestellt, mithin gilt $U_{-} = 0$ V. Die Länge der Zeitlinie beträgt $t_{ZL} = 1{,}5$ msec, das Signal wurde an Buchse B 3 entnommen.
Der sich zu den Sinuskuppen hin verbreiternde Kurvenzug läßt auf gewisse Störungen im Ablauf der Sinuswandlung schließen. Eine Aussage über die

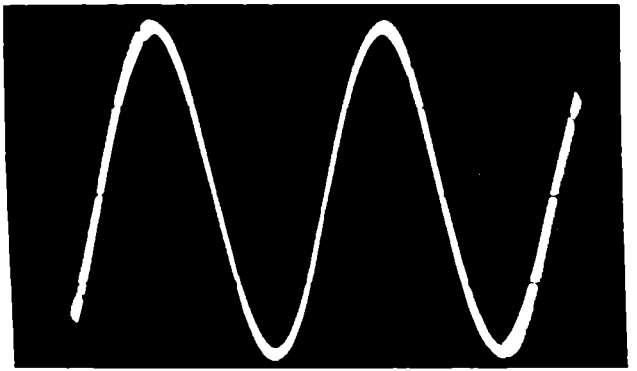


Bild 27

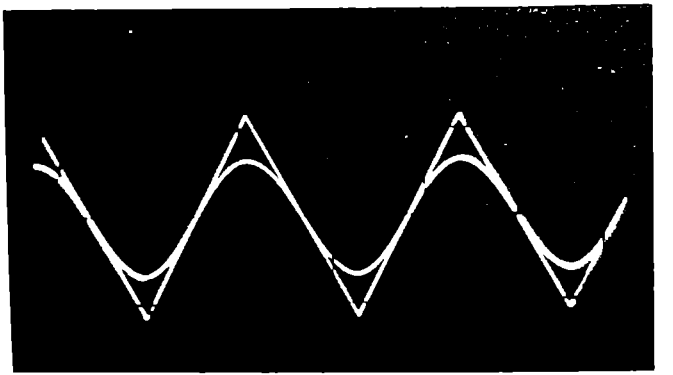


Bild 28

harmonische Verzerrung kann anhand eines derartigen Oszillogrammes nicht getroffen werden. Nach Angaben von Intersil beläuft sich die harmonische Verzerrung bei optimaler Einstellung der Regler R_{12} und R_{13} (vgl. Bild 4) auf max. 1%. Da der schnelle Operationsverstärker µA 715 (IC_4) kaum die Sinusform verschlechtern wird, kann man auch am Ausgang B 3 mit einer harmonischen Verzerrung rechnen, die nicht viel schlechter als 1% sein wird.

Bild 28:
Dieses Bild zeigt die zeitliche Zuordnung von Dreieck- und Sinusfunktion. Die Spannungen wurden direkt an den IC-Pins 3 (⋀) und 2 (∼) abgegriffen, die Frequenz beträgt f = 2 kHz und die Amplituden $\hat{U}_{\wedge} = 7{,}5$ V und $\hat{U}_{\sim} = 5$ V. Die Länge der Zeitlinie beläuft sich auf ca. $t_{ZL} = 1{,}8$ msec, als Chopperfrequenz wurden $f_{CH} = 80$ Hz eingestellt.
Anhand dieses Bildes findet man wiederum die theoretischen Erläuterungen des Abschnittes 2.1. zur Erzeugung der Sinusfunktion aus der Dreieckfunktion anhand eines besonderen Sinuswandlers bestätigt (vgl. Bild 2). Auf dem Oszillogramm ist die stufenweise Abschwächung des Dreiecks in Form von Unstetigkeiten in der Steigung des Sinus absolut nicht erkennbar. Also ist es offenbar anhand des Sinuswandlers gelungen, eine gute Sinusfunktion auch aus der Dreieckfunktion zu erzeugen.

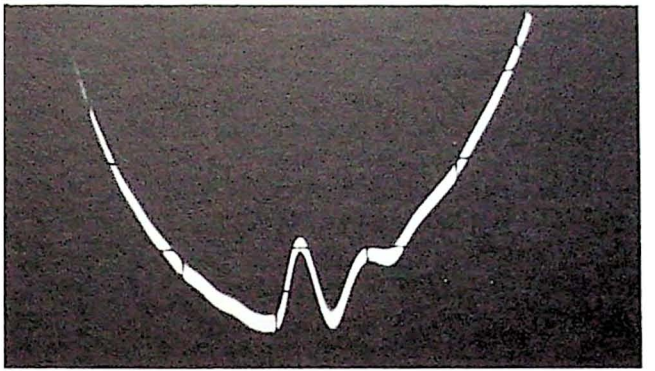


Bild 29

Bild 29:
Mittels einer 2. Zeitbasis wurde eine Sinuskuppe der auf Bild 27 dargestellten Sinusfunktion vergrößert. Die Frequenz f = 2 kHz wurde beibehalten, ebenso die Amplitudeneinstellung von $\hat{U} = 4$ V; der Offset wurde auf $U_{=} = +4$ V geändert. Der Eingangsteiler am Oszilloskop wurde auf 0,1 V/cm eingestellt, die Länge der Zeitlinie beträgt $t_{ZL} = 1{,}8$ µsec, das Signal wurde an der Buchse B 3 abgegriffen.
Wenn man sich die zeitliche Zuordnung der 3 Funktionen anhand der Bilder 25 und 28 nochmals verdeutlicht, erkennt man wiederum, daß im Moment des Umschaltens des Rechteckausganges die Sinusspannung für die Dauer von ca. 400 nsec leicht einbricht (ca. 65 mV). D. h., auch beim Sinus wirkt sich die schnelle Laständerung und somit die Belastung der Stromversorgung als auch der Konstantstromquellen I und II zum Zeitpunkt des Umschaltens des Rechteckausganges aus. Da die Sinusfunktion aus der Dreieckfunktion abgeleitet wird, war dies aufgrund der Erläuterung zu Bild 26 auch zu erwarten. Die Störungen von Bild 26 und 29 ähneln sich im Kurvenverlauf.

3.2. Definitionen zur Rechteck-, Dreieck- und Sinusfunktion

Im folgenden wurden wichtige Begriffe und Größen, die zur Beschreibung der Rechteck-, Dreieck- und Sinusfunktion erforderlich sind, zusammengestellt. Die jeweilige Dimension wurde in eckigen Klammern angegeben.

Rechteck:

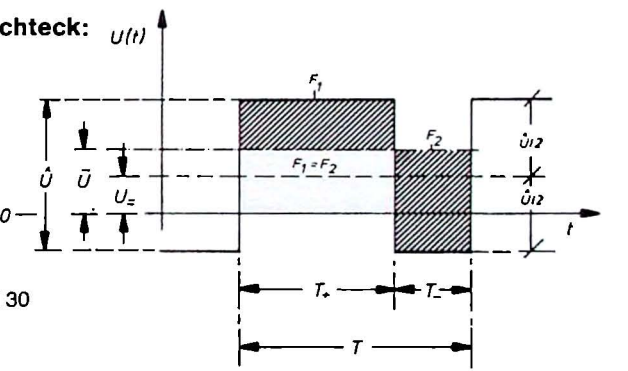


Bild 30

Periodendauer [sec] = T
Frequenz [Hz = 1/sec] = f = 1/T
negative Pulslänge [sec] = T-
positive Pulslänge [sec] = T+
Tastverhältnis [dimensionslos] = T-/T+ od. T-:T+
Momentanwert der Spannung [V] = U(t)
Amplitude [V] = Û
Offsetspannung [V] = U-

$$\text{Mittelwert [V]} = \bar{U} = \frac{1}{T}\int_0^T U(t)\,dt$$

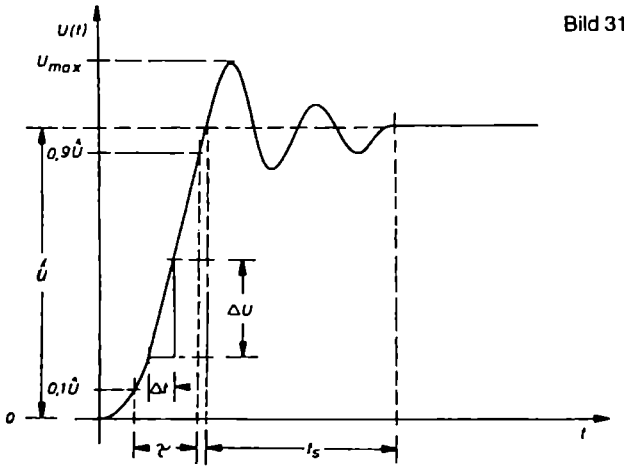


Bild 31

Flankenanstiegszeit (bzw. Flankenabfallzeit) [sec] = τ

$$\text{Anstiegsrate [V/sec]} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{0{,}8\,\hat{U}}{\tau}$$

(„Pro Zeiteinheit Δt ändert sich die Spannung U (t) um ΔU(t)." Es sei Δt ein sehr kleiner Wert.)
Einschwingzeit [sec] = t_s
Überschwingen [%] = $\ddot{u} = \frac{U_{max}-\hat{U}}{\hat{U}} \cdot 100$ [%]

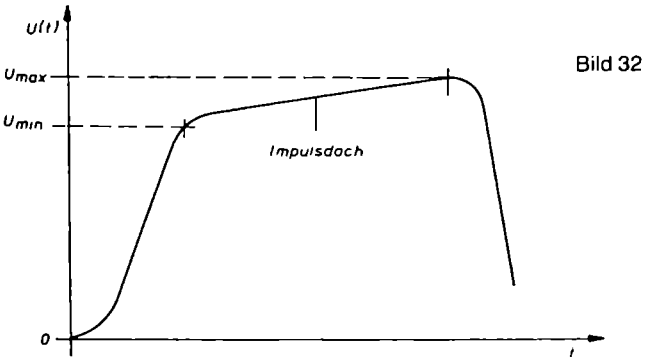


Bild 32

$$\text{Dachschräge [\%]} = D = \frac{U_{max}-U_{min}}{U_{max}} \cdot 100\ [\%]$$

Dreieck:

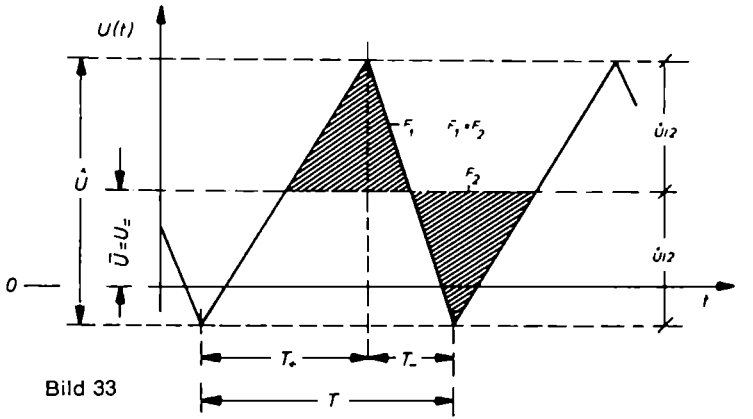


Bild 33

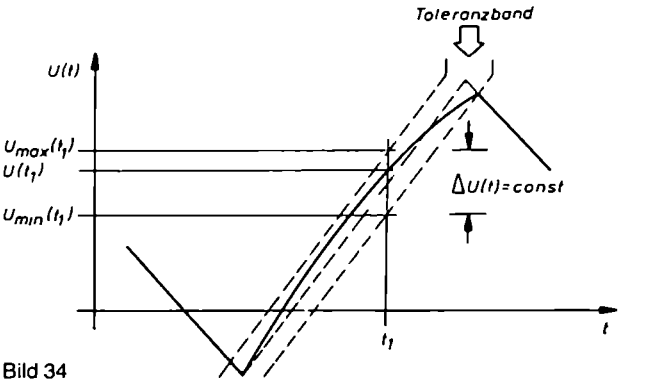


Bild 34

Periodendauer [sec]	= T
Frequenz [Hz = 1/sec]	= f = 1/T
Positive Rampe [sec]	= T+
Negative Rampe [sec]	= T-
Tastverhältnis [dimensionslos]	= T-/T+ oder T- : T+
Momentanwert der Spannung [V]	= U (t)
Amplitude [V]	= Û
Offsetspannung [V]	= U–

Mittelwert [V] $= \bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t)\,dt$

Linearitätsabweichung [%]

$$= l = \frac{U_{max}(t_1) - U_{min}(t_1)}{U(t_1)}$$

"Die Linearitätsabweichung ist kleiner als l, wenn der Momentanwert U(t) der Spannung innerhalb des Toleranzbandes verbleibt."

Sinus:

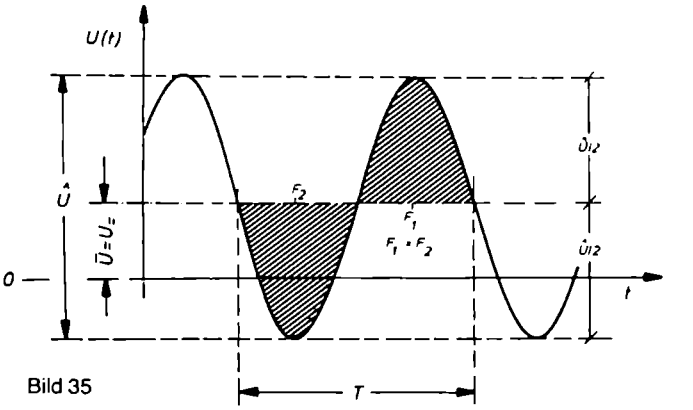


Bild 35

Periodendauer [sec] : = T
Frequenz [Hz = 1/sec] = f = 1/T
Kreisfrequenz = $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$
[Hz = 1/sec]
Momentanwert der
Spannung [V] : = U(t)
Offsetspannung [V] : = U₌

Mittelwert [V] = $\bar{U} = \frac{1}{T}\int_0^T U(t)\,dt$

Amplitude [V] : = Û
Klirrfaktor (= k) : Der Klirrfaktor (harmonische Verzerrung) gibt an, wie weit die Sinusfunktion von der Idealform abweicht. Die formelmäßige Definition, die hier der Vollständigkeit halber angegeben werden soll, lautet:

$$k = \frac{2}{\hat{U}_1^2} \cdot \sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{1}{2} \cdot \hat{U}_n^2\right)$$

wobei: $\hat{U}_1$ = Amplitude der Grundschwingung n=1

$\hat{U}_n$ = Amplitude der n-ten Oberschwingung mit n=2,3,4,.....∞

$\sum_{n=2}^{\infty}$ = Summe aller $\frac{1}{2}U_n^2$ über alle möglichen Oberschwingungen

„Der Klirrfaktor (harmonische Verzerrung) ist um so geringer, je geringer der Oberwellengehalt der Sinusschwingung ist."

3.3. Datenblatt zum Funktionsgenerator

Frequenzbereich:
f = 0,02 Hz – f = 200 kHz
in 6 Bereichen
I. f = 0,2 Hz – f = 2 Hz
II. f = 2 Hz – f = 20 Hz
III. f = 20 Hz – f = 200 Hz
IV. f = 200 Hz – f = 2 kHz
V. f = 2 kHz – f = 20 kHz
VI. f = 20 kHz – f = 200 kHz

Ausgangsamplitude:
Sinus: $\hat{U}\sim$ = 5,5 V Leerlaufspannung
Rechteck: $\hat{U}\,\sqcap\!\sqcup$ = 5,5 V Leerlaufspannung
Dreieck: $\hat{U}\,\diagup\!\diagdown$ = 5,5 V Leerlaufspannung

Ausgangswiderstand $R_i \approx 100\ \Omega$
Der Ausgangswiderstand R_i ist unabhängig von der Stellung des Amplitudenreglers.

Offset:
$U_{-} = \pm 6$ V Leerlaufspannung
Der Offset ist kontinuierlich regelbar. $U_{-} = 0$ V bei Mittelstellung des Potentiometers.

Tastverhältnis: T– : T+ = 1 : 1

FM-Frequenzhub

I. ca. f_{min} = 0,02 Hz – f_{max} = 2 Hz
II. ca. f_{min} = 0,2 Hz – f_{max} = 20 Hz
III. ca. f_{min} = 2 Hz – f_{max} = 200 Hz
IV. ca. f_{min} = 20 Hz – f_{max} = 2 kHz
V. ca. f_{min} = 200 Hz – f_{max} = 20 kHz
VI. ca. f_{min} = 2 kHz – f_{max} = 200 kHz

FM-Spannung: $+4\ V < U_{FM} < +12\ V$
$\rightarrow \Delta U_{FM} = 8\ V$

FM-Linearität: $l_{FM} < 0{,}2\%$ 1)

Rechteck: Ansteigende Flanke:
Anstiegszeit: $\tau_{an} < 200$ nsec
Einschwingzeit $t_{san} < 200$ nsec
Überschwingen $\ddot{u}_{an} = 0\%$
Dachschräge $D_{an} = 0\%$
Anstiegsrate $\left(\frac{\Delta U(t)}{\Delta t}\right)_{an} > 22$ V/µsec

Rechteck: Abfallende Flanke

Abfallzeit	$\tau_{ab} < 200$ nsec
Einschwingzeit	$t_{sab} < 300$ nsec
Überschwingen	$\ddot{u}_{ab} < 10\%$
Dachschräge	$D_{ab} = 0\%$
Abfallrate	$\left(\frac{\Delta U(t)}{\Delta t}\right)_{ab} > 22$ V/µsec

Dreieck: Linearität : $l < 1\%$ 1)

Sinus: Harmonische Verzerrung : $< 1\%$ 1)

Frequenzdrift mit der Temperatur: 1)
$5 \cdot 10^{-5}$ %/°C für 0 °C < T <70 °C

Änderung der Ausgangsspannung mit der

Frequenz f bezogen auf f = 1 kHz: ±2%

Bestückung: 2 Si-Gleichrichter
1 Si-Diode
1 LED
4 ICs

Netz: 220 V~

zu 1): nach Angaben von Intersil

3.4. Der Funktionsgenerator bei ohmsch-kapazitiver Last

Im folgenden Abschnitt wollen wir uns mit der Anwendung des Funktionsgenerators als Meßinstrument bei ohmsch-kapazitiver Last beschäftigen, da hierbei im Gegensatz zu rein ohmscher Last Probleme auftreten, die man kennen sollte.

Viele an den Ausgang des Funktionsgenerators anzuschließenden Schaltungen und Geräte, z. B. ein Oszilloskop, ein Meßverstärker oder auch ein zu messendes unbekanntes Netzwerk haben Tiefpaßcharakter, d. h. sie können nicht beliebig hohe Frequenzen übertragen. Die Eingangsstufen dieser externen Geräte oder auch jeder beliebigen anderen Schaltung sind mit einer Kapazität C_L behaftet, wie Bild 36 zeigt. Diese Kapazität, die man sich dem Eingangswiderstand R_L parallelgeschaltet vorstellen kann, muß nicht unbedingt dinglich als Kondensator vorhanden sein. Bereits zwei Anschlußdrähte eines Bauelementes, zwei Schalterkontakte, eine Steckverbindung oder, was bei Schaltungsentwürfen oftmals sehr genau berücksichtigt werden muß, die Sperrschichten eines bipolaren Transistors bzw. die Gate-Substrat-Übergänge beim MOSFET stellen Teilkapazitäten dar.

Da der „Widerstand" einer Kapazität mit zunehmender Frequenz abnimmt, wird auch der Spannungsabfall am Innenwiderstand R_L des externen Netzwerkes mit steigender Frequenz geringer, d. h. die

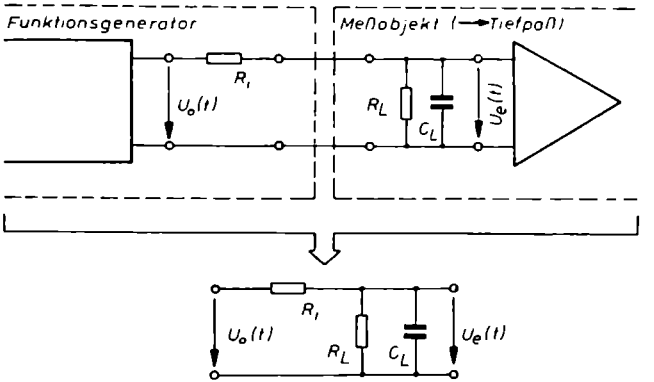


Bild 36 Funktionsgenerator bei ohmsch-kapazitiver Last

Spannung U_e (t) (vgl. Bild 36), die an das Meßobjekt gelangt, ist eine Funktion der Frequenz. Um das Verhalten der Spannung $U_e(t)$ in Abhängigkeit von der Frequenz in den Griff zu bekommen, kann die Anordnung – Funktionsgenerator-Meßobjekt mit Tiefpaßcharakter – in Bild 36 oben durch das unten gezeichnete einfache RC-Netzwerk ersetzt werden. Der Ausgangswiderstand R_i des Funktionsgenerators (vgl. 3.3. „Technische Daten zum Funktionsgenerator" → $R_i = 100\ \Omega$) liegt in Reihe mit den parallelgeschalteten Elementen R_L und C_L, welche den komplexen Eingangswiderstand des Meßobjekts darstellen.

Wenn wir nun an diese RC-Anordnung eine sinusförmige Spannung $U_o(\omega t)$ der variablen Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ anlegen (vgl. Abschnitt 3.2.) und die Frequenz verändern, so wird sich bei fest eingestelltem Pegelregler dennoch der Betrag der Spannung U_e (ωt) ändern. Wenn wir das Verhältnis der sinusförmigen Spannung U_e (ωt) am Ausgang des RC-Netzwerkes des Bildes 36 zur ebenfalls als sinusförmig vorgegebenen Spannung U_o (ωt) am Eingang der Anordnung bilden, so erhalten wir folgenden Ausdruck, der hier nicht weiter hergeleitet werden soll:

$$\frac{U_e}{U_o} = \frac{1}{\sqrt{(R_i/R_L + 1)^2 + (\omega R_i C_L)^2}};\quad \frac{U_e}{U_o} = f\,(\omega, R_i, R_L, C_L)$$

Dieses Spannungsverhältnis hängt natürlich nicht nur von der Kreisfrequenz ω ab, sondern auch von den vorliegenden Widerstandswerten R_i, R_L bzw. von der Kapazität C_L. Mit zunehmender Kreisfrequenz ω wird das Glied $(\omega R_i C_L)^2$ unter der Wurzel immer größer, d. h. der gesamte Bruch wird immer kleiner. Je höher also ω, desto kleiner wird die Spannung $U_e(\omega t)$.

Für den in der Praxis zumeist vorliegenden einfachen Fall, daß R_L sehr viel größer als R_i ($R_L \gg R_i$) ist, wird in obigem Ausdruck für U_e/U_o das Glied R_i/R_L sehr viel kleiner als 1, so daß das Verhältnis U_e/U_o einfacher als

$$\frac{U_e}{U_o} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega R_i C_L)^2}};\quad \frac{U_e}{U_o} = f\,(\omega, R_i, C_L)$$

geschrieben werden kann.

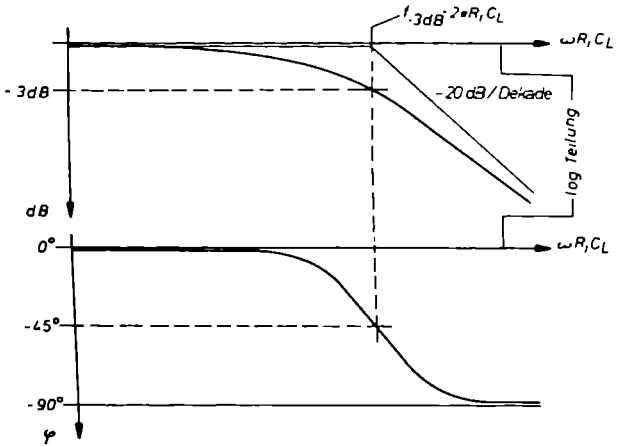


Bild 37 Betragsfrequenzgang und Phasenwinkelfrequenzgang des RC-Netzwerkes von Bild 36, wobei $R_i << R_L$ bei sinusförmiger Eingangsspannung $U_e(t)$

Die obere Kurve auf Bild 37 veranschaulicht den Funktionsverlauf U_e/U_o für den Fall $R_L \gg R_i$ grafisch. Ein derartiges Diagramm wird „Betragsfrequenzgang" oder „BODE-Diagramm" genannt. Allerdings ist dabei auf der vertikalen Achse nicht das Spannungsverhältnis U_e/U_o aufgetragen, sondern die dB-Zahl (dB heißt Dezi-Bel). Man definiert in der Elektrotechnik die dB-Zahl, die sich allgemein eingebürgert hat, als den zwanzigfachen Zehnerlogarithmus des Übertragungsverhältnisses.

Mithin gilt: dB-Zahl = 20 log (U_e/U_o).

Auf der horizontalen Achse wurde nicht ω, sondern wie allgemein üblich $\omega R_i C_L$ aufgetragen, wodurch sich aber der Verlauf rein qualitativ nicht ändert.

Wie aus Bild 37 deutlich zu erkennen ist, verläuft die Kurve bei niedrigen Frequenzen zunächst einmal sehr flach, um dann plötzlich ab einer bestimmten Frequenz sehr stark mit – 20dB pro Dekade abzufallen. Also nimmt der Betrag $U_e(\omega t)$ ab einer bestimmten Frequenz (die von der Wahl des Widerstandes R_i und des Kondensators C_L abhängt) rapide ab. Die Frequenz, bei der die dB-Zahl gerade den Wert -3dB erreicht hat (-3dB entspricht einem Spannungsverhältnis U_e/U_o von $1/\sqrt{2}$), wird Grenzfrequenz genannt. Die Grenzfrequenz ist für den Fall, daß nicht auch zu niedrigen Frequenzen hin die Kurve unter -3dB absinkt, identisch mit der Bandbreite. Dies ist selbstverständlich für Gleichspannungsverstärker der Fall, aber auch für allgemeinübliche Wechselspannungsverstärker mit einer unteren Grenzfrequenz von einigen Hertz kann man die Bandbreite gleich der oberen Grenzfrequenz setzen. Wir wollen die (obere) Grenzfrequenz mit f_{-3dB} abkürzen, die Bandbreite mit B. Für den Fall $R_L \gg R_i$ errechnet sich die Grenzfrequenz f_{-3dB} nach der einfachen Beziehung:

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi R_i C_L} ; \quad f_{-3dB} \approx B$$

Weist ein Oszilloskop z. B. eine Bandbreite von B = 10 MHz auf, so bedeutet dies, daß die dB-Zahl für

Frequenzen, die größer als f = 10 MHz sind, kleiner als −3dB wird. Mißt man mit einem Oszilloskop also Frequenzen größer f = 10 MHz, so muß man sich darüber im klaren sein, daß dann das Oszilloskop nicht mehr richtig anzeigt.

Auch die Phasenverschiebung zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung (vgl. Bild 38) des RC-Netzwerkes aus Bild 36 hängt wie auch die Phasenverschiebung jedes beliebigen anderen RCL-Netzwerkes von der Frequenz ab. Die untere Kurve in Bild 37 zeigt die Abhängigkeit der Phasenverschiebung φ von der Frequenz für den Fall $R_L \gg R_i$. Der Vollständigkeit halber sei auch die Formel für φ als Funktion von ω, R_i, C_L angegeben, in welcher die Arcustangens-Funktion auftritt.

$$\varphi = \arctan(-\omega R_i C_L)$$

Aus Bild 37 wird ersichtlich, daß genau für die definierte Grenzfrequenz f_{-3dB} der Winkel zwischen Eingangsspannung U_o (ωt) und Ausgangsspannung U_e (ωt) 45° beträgt. Für kleine Frequenzen ist die Phasenverschiebung φ ungefähr Null, für große Frequenzen nähert sich φ asymptotisch der Linie $\varphi = -90°$.

Wie wir aus den bisherigen Betrachtungen ersehen können, hängt die tatsächlich auf das Meßobjekt wirkende Spannung nach Betrag und Phase von dem komplexen Eingangswiderstand des Meßobjektes ab. Die angegebenen Beziehungen gelten nur für sinusförmige Größen.

Nunmehr wollen wir untersuchen, wie unser Netzwerk von Bild 36 reagiert, wenn wir an den Eingang eine rechteckförmige Spannung $U_o(t)$ anlegen.

Wir wollen annehmen, daß die Flankenanstiegs- bzw. Abfallzeit τ_{an} bzw. τ_{ab} unseres Funktionsgenerators (vgl. Datenblatt 3.3.) sehr kurz im Vergleich zur Zeitkonstan-

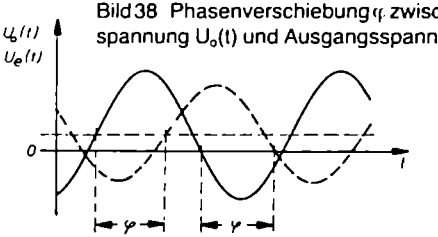


Bild 38 Phasenverschiebung φ zwischen Eingangsspannung $U_o(t)$ und Ausgangsspannung $U_a(t)$

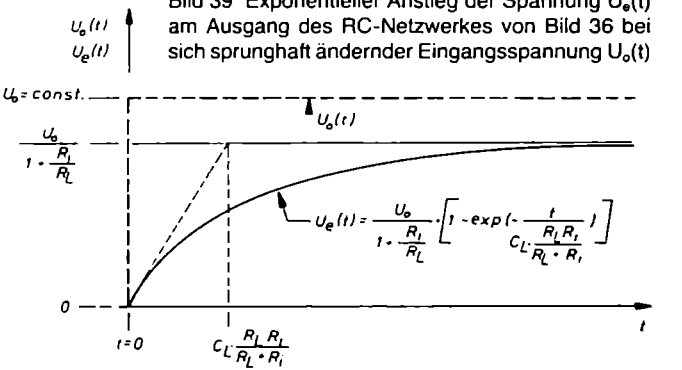


Bild 39 Exponentieller Anstieg der Spannung $U_e(t)$ am Ausgang des RC-Netzwerkes von Bild 36 bei sich sprunghaft ändernder Eingangsspannung $U_o(t)$

ten $R_i C_L$ sei. Wir können dann für $U_o(t)$ einen Verlauf annehmen, wie er in Bild 39 gezeichnet wurde, d. h. für $t < 0$ ist $U_o(t) = 0$, für $t > 0$ ist $U_o(t) = U_o = \text{const}$. Da die Kapazität C_L aufgeladen werden muß, wird die Spannung $U_e(t)$ am Ausgang des Netzwerkes nicht der sprunghaften Änderung der Spannung $U_o(t)$ am Eingang sofort folgen können. $U_e(t)$ wird also nur allmählich ansteigen und schließlich einem Wert zustreben, der vom Verhältnis R_i/R_L bestimmt wird (vgl. Bild 39). Man kann diesen allmählichen Anstieg der Spannung $U_e(t)$ genau ausrechnen. Man findet, daß es sich um einen exponentiellen Anstieg handelt; die Gleichung lautet:

$$U_e(t) = \frac{U_o}{1 + (R_i/R_L)} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{C_L \dfrac{R_L R_i}{R_L + R_i}}\right)\right]$$

Für den Fall, daß $R_L \gg R_i$ ist, vereinfacht sich die Beziehung und es folgt:

$$U_e(t) = U_o \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{C_L R_i}\right)\right]$$

Dieser in der Praxis zumeist auftretende Sonderfall wurde auf Bild 40 dargestellt. Im Gegensatz zu der sich sprunghaft ändernden Spannung $U_o(t)$ steigt $U_e(t)$ allmählich an, der Kondensator C_L wird aufgeladen, und nach theoretisch unendlich langer Zeit erreicht $U_e(t)$ den Wert $U_o = \text{const}$.

Die Zeit, die vergeht, wenn $U_e(t)$ vom Wert $0{,}1\ U_o$ auf den Wert $0{,}9\ U_o$ ansteigt, wird entsprechend den

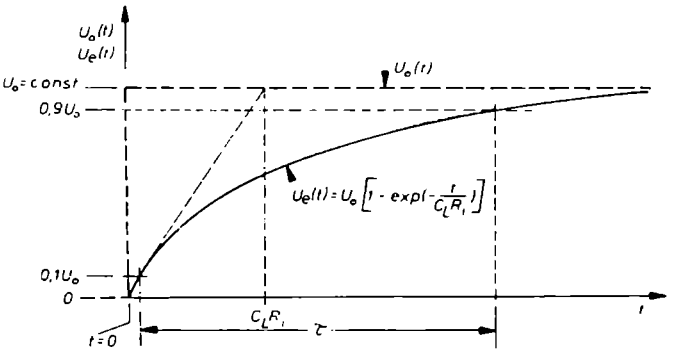


Bild 40 Exponentieller Anstieg der Spannung $U_o(t)$ am Ausgang des RC-Netzwerkes von Bild 36, wobei $R_i << R_L$ bei sich sprunghaft ändernder Eingangsspannung $U_o(t)$

Definitionen unter Punkt 3.2 Anstiegszeit genannt. Diese Anstiegszeit τ kann sehr einfach aus R_i und C_L berechnet werden. Es gilt für den Fall $R_L \gg R_i$ die Formel:

$\tau \approx 2{,}2\ R_i C_L$

τ ist unabhängig vom Wert $U_o = \text{const}$.

Wenn nunmehr mit der abfallenden Flanke der Rechteckfunktion die Spannung $U_o(t)$ sprungartig vom Wert $U_o = \text{const}$. auf den Wert $U_o = 0$ fällt, kann wiederum $U_e(t)$ dieser schnellen Änderung am Eingang des Netzwerkes nicht folgen. Der Kondensator C_L muß

nämlich erst entladen werden Für den Entladevorgang ergibt sich für $R_L \gg R_i$ der Spannungsverlauf $U_e(t)$ zu:

$$U_e(t) = U_o \cdot \exp\left(-\frac{t}{C_L R_i}\right)$$

Auf Bild 41 wurde der Verlauf $U_e(t)$ für den Fall gezeichnet, daß die Zeitkonstante $C_L R_i$ ($C_L R_i$ hat die Dimension sec und kann grafisch in Bild 40 durch Anlegen der Tangente im $t = 0$ an die Kurve $U_e(t)$ und

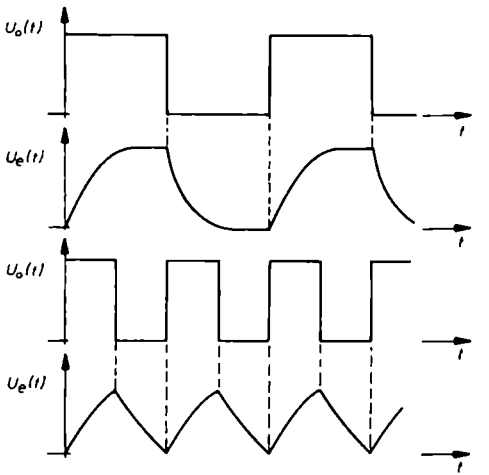


Bild 41 Spannung $U_e(t)$ am Ausgang des Netzwerkes von Bild 36, wobei $R_i << R_L$ bei rechteckförmiger Eingangsspannung $U_o(t)$
oben: $C_L R_i < T_-, T_+$ unten: $C_L R_i > T_-, T_+$

Schneiden dieser Tangente mit der Asymptote U_o = const. ermittelt werden. Rechnerisch ergibt sich die Dimension sec wenn man berücksichtigt, daß 1Ω = 1 V/A und 1 F = 1 Asec/V ist) größer als die negative bzw. positive Pulslänge T- bzw. T+ der Rechteckfunktion ist, sowie für den Fall, daß die Zeitkonstante $C_L R_i$ erheblich kleiner als T- bzw. T+ ist. Ist die Zeitkonstante $C_L R_i$ größer als T- bzw. T+ (→ Bild 41 unten), so kann die Spannung $U_e(t)$ den Wert U_o = const. nicht mehr erreichen, da bereits während des Aufladevorganges die Spannung $U_o(t)$ auf den Wert 0 zurückspringt. Für diesen Fall ist also am Ausgang des Netzwerkes von einer Rechteckspannung absolut nichts mehr zu sehen.

Abschließend sei noch eine Beziehung angegeben, die die obere Grenzfrequenz f_{-3dB} eines Systems mit der Anstiegszeit τ verknüpft und sehr oft angewandt wird. Die Formel lautet:

$$\tau \approx 0{,}35/f_{-3dB}$$

Hat ein NF-Verstärker z. B. eine obere Grenzfrequenz von $f_{-3dB} = 20\ kHz = 2 \cdot 10^4\ sec^{-1}$, so ergibt sich für die Anstiegszeit ein Wert $\tau = (0{,}35/2) \cdot 10^{-4}$ sec = 17,5 µsec. Das bedeutet, daß eine Rechteckspannung von f = 10 kHz mit einer Pulslänge von T+ = T- = 50 µsec schon total verzerrt wird.

Wie aus den bisherigen Ausführungen deutlich hervorgeht, müssen beim Arbeiten mit dem Funktionsgenerator durchaus die Eigenschaften extern ange-

schlossener Netzwerke, also z. B. Oszilloskope, Meßverstärker, Chopper oder eben auch Meßobjekte, berücksichtigt werden, um zu richtigen Ergebnissen zu gelangen.
Andererseits kann ein Funktionsgenerator natürlich besonders in Verbindung mit einem Oszilloskop zur Messung von unbekannten Netzwerken herangezogen werden. Dies ist das wichtigste Anwendungsgebiet eines Funktionsgenerators, wenn man einmal von der trivialen Verwendung als Impulsquelle absieht. Es können z. B. mit einem Funktionsgenerator und einem Oszilloskop, deren technische Daten ja bekannt sind, unbekannte Frequenzgänge von NF-Verstärkern oder besonders beschalteten Operationsverstärkern aufgenommen werden, weiterhin kann das Frequenzverhalten von RC-, RL-, LC-Netzwerken analysiert werden; es können Kapazitäten und Induktivitäten ermittelt werden, ebenfalls z. B. Eingangsimpedanzen von Verstärkern oder anderen Schaltungen. Man kann Klangregelnetzwerke austesten oder z. B. die Dimensionierung von Frequenzweichen experimentell ermitteln. Steht ein Zweikanal-Oszilloskop oder ein Chopper zur Verfügung, so können auch Phasenverschiebungen und Phasenfrequenzgänge gemessen werden. Fast alle regelungstechnischen Grundelemente wie z. B. Proportionalglieder, Addierer, Multiplizierer, Integrierer, Differenzierer und Komparatoren können mit einem Funktionsgenerator und einem Oszilloskop ausgetestet werden, ebenso können Messungen an Lead- bzw. Lag-Gliedern durchgeführt werden. Schließlich erschließt der externe FM-Eingang weitere Anwendungsmöglichkeiten. Es ist damit z. B. die Simulation bestimmter Regelungsschaltungen möglich oder die Umwandlung von Spannung in eine proportionale Frequenz.

4. Anhang

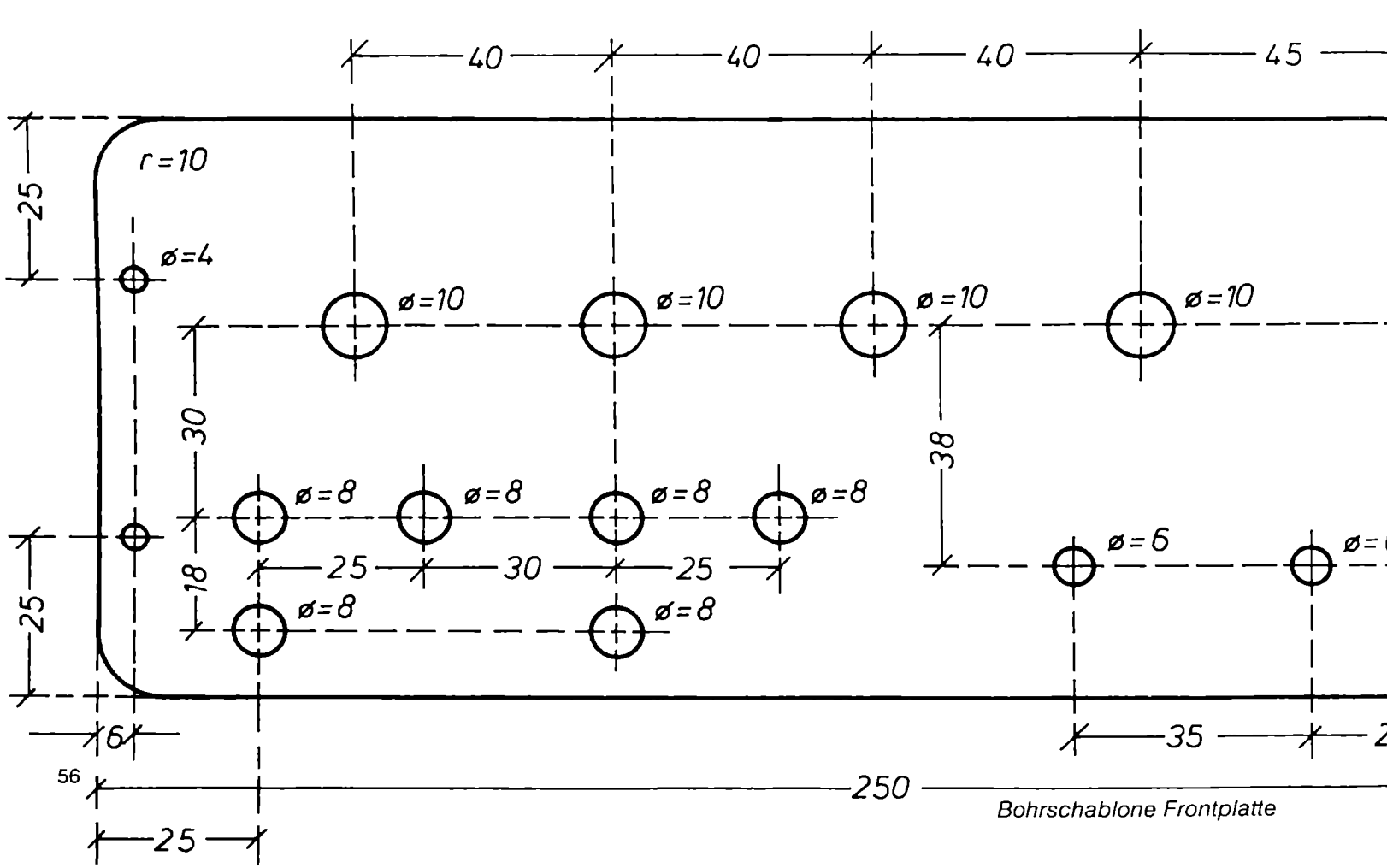
Reproduktionsvorlagen 1 : 1

Abstreichlisten für die einzelnen Arbeitsgänge

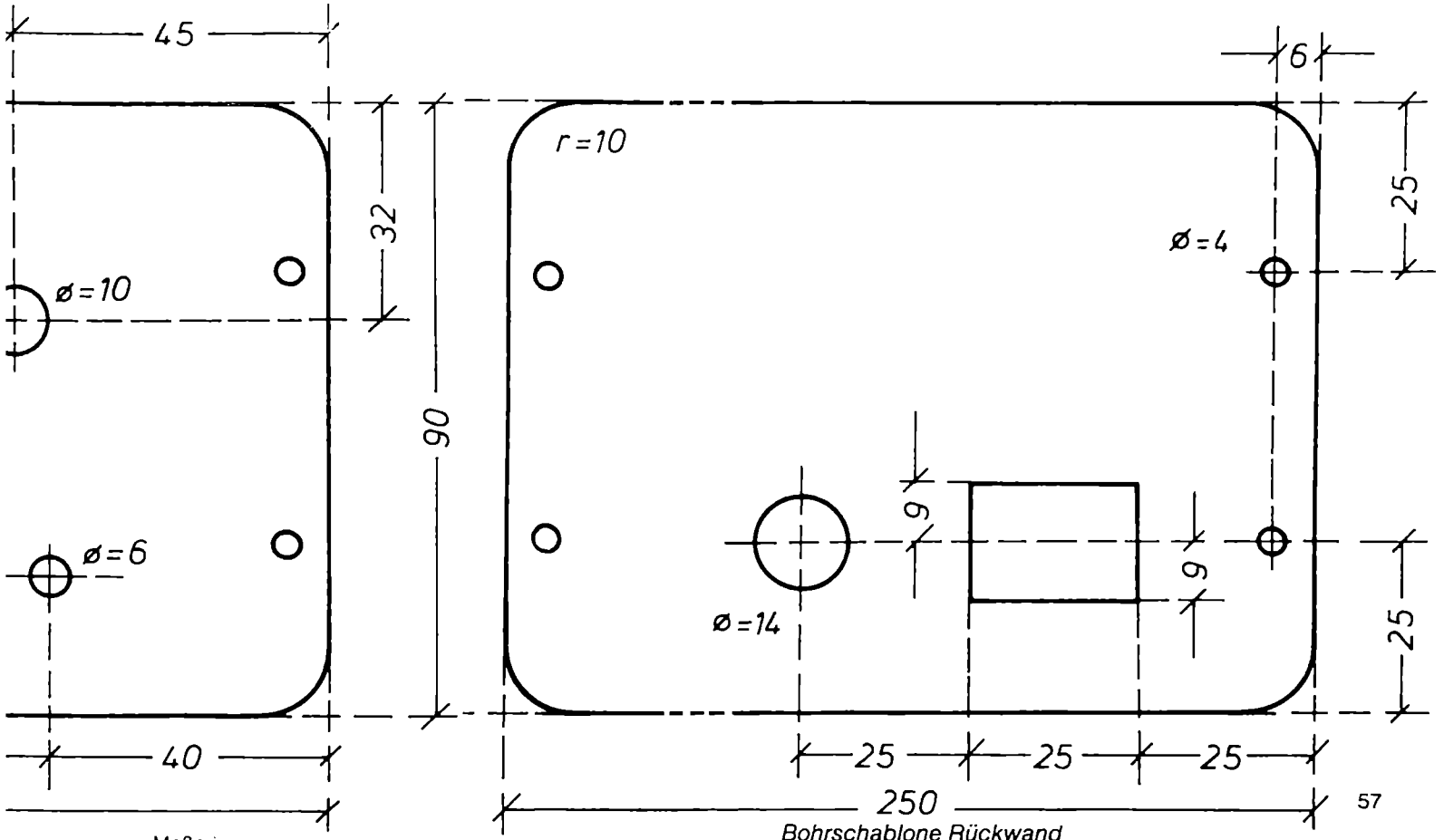
Dieser Anhang ist so gestaltet, daß die einzelnen Blätter zur Reproduktion bzw. zur besseren Handhabung aus dem Buch herausgetrennt werden können.

Wenn Sie dies wollen, verfahren Sie bitte so:

Die Doppelseiten 56/57 und 72/73 vorsichtig aus der Heftung herausreißen –
die anderen Blätter mit der Schere an der gestrichelten Linie abschneiden.



Bohrschablone Frontplatte



Maße in mm

Bohrschablone Rückwand

Bestückung der Leiterplatte

Die im Bausatz zum Funktionsgenerator mitgelieferte Leiterplatte ist zwar bereits geätzt, aber noch nicht gebohrt.

Legen Sie die Platine mit der Leiterseite nach oben auf eine ebene Holzunterlage. Bohren Sie nunmehr die Löcher zur Aufnahme der Bauteile mit Spiralbohrern mit folgenden Durchmessern:

- 0,8 mm: für IC 1, IC 2, IC 3, IC 4, D 1;
- 1,2 mm: für die Lötstifte und für die beiden Kohleschicht-Trimmpotentiometer R_{12} und R_{13};
- 1,0 mm: für alle weiteren Bauteile;
- 3,5 mm: für die 4 Befestigungsschrauben.

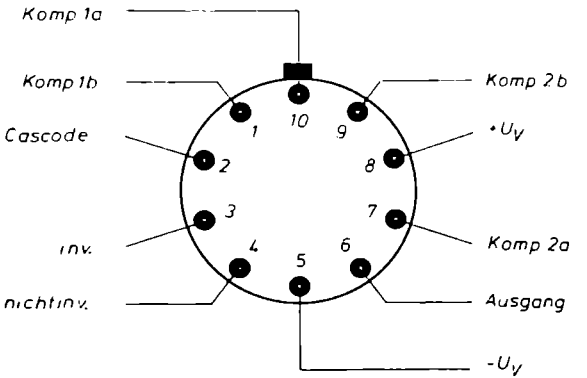
Als Bohrmaschinen eignen sich speziell für diesen Zweck im Fachhandel erhältliche Kleinstbohrmaschinen oder eine Heimwerker-Bohrmaschine in Verbindung mit einem Bohrständer oder einer biegsamen Welle. Ungeeignet sind Hand-Drillbohrer o. ä.
Da die aus Glasfasergewebe bestehende Leiterplatte äußerst hart ist, können die Bohrer sehr schnell, z. B. bereits nach ca. 50 Bohrungen, stumpf sein. Verwenden Sie keine stumpfen Bohrer, da dann auf den Kupferbahnen um die Bohrlöcher herum ein Grat entsteht, welcher beim Löten einen einwandfreien Fluß des Lötzinns verhindert.

Reinigen Sie nun die gebohrte Platine und entfernen Sie eine mögliche Oxydschicht auf den Kupferbahnen mit einem Scheuermittel.

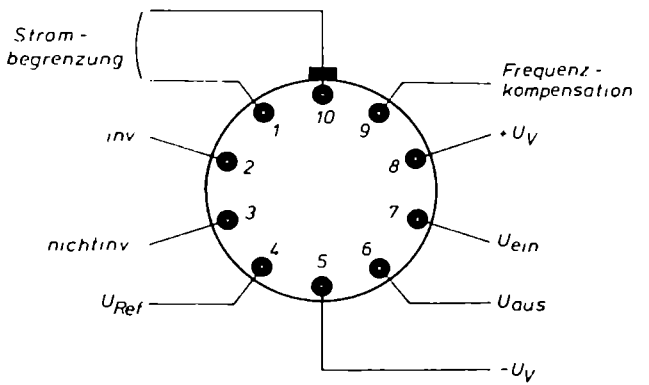
Besprühen Sie nunmehr die Leiterseite der Printplatte mit einem Schutzlack aus der Spraydose, welcher gleichzeitig als Isolierlack und als Lötflußmittel wirkt. Wenn Sie sparsam und gleichmäßig aus ca. 20 cm Entfernung gesprüht haben, wird der Lack in wenigen Minuten trocken sein.

Mit einem Feinlötkolben von ca. 30 Watt löten Sie zunächst die insgesamt 27 Lötstifte auf der Printplatte fest. Die leicht keilförmig ausgebildeten Lötstifte sollten zuvor fest in den vorgesehenen Löchern festgeklemmt werden, damit sie sich später beim Anlöten der Kabel nicht wegen des nochmaligen Erhitzens von der Platine lösen.

Als nächstes müssen alle Widerstände eingelötet werden. Biegen Sie die Anschlußdrähte entsprechend den Lochabständen rechtwinklig ab und stecken Sie sie durch die Leiterplatte. Kneifen Sie nunmehr die zu langen Drahtenden mit einem Seitenschneider ab und löten Sie die Anschlüsse fest. Kürzen Sie bitte zuerst die Drahtenden und löten dann, da bei umgekehrter Reihenfolge kalte Lötstellen entstehen können.



Sockelanschlußbild für IC 4 (von oben gesehen)



Sockelanschlußbild für IC 1 und 2 (von oben gesehen)

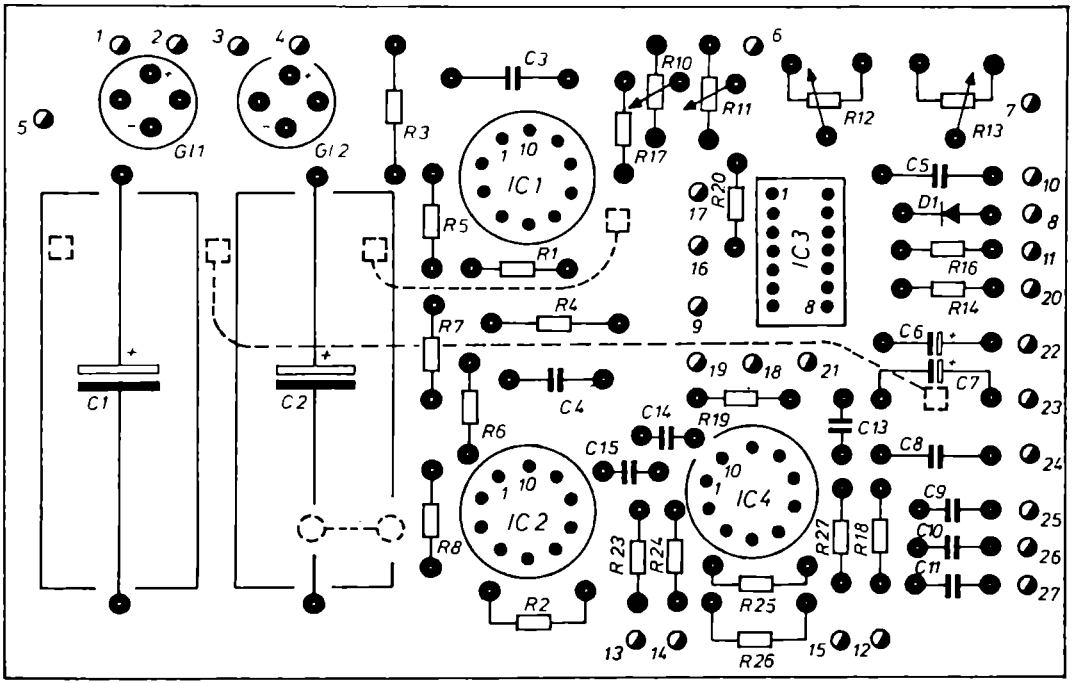
○ Löten Sie nunmehr alle weiteren Bauteile mit Ausnahme der integrierten Schaltkreise fest, wobei Sie bitte die obigen Hinweise beachten. Achten Sie auf die richtige Polung der Kondensatoren C_1, C_2, C_6, C_7 und der Diode D_1. Vergessen Sie nicht, die Spindelpotentiometer R_{10} und R_{11} vor dem Einlöten auf genau 3,19 kΩ mit einem Ohmmeter abzugleichen, falls Ihnen kein gutes Frequenz-Meßgerät zur Verfügung steht.

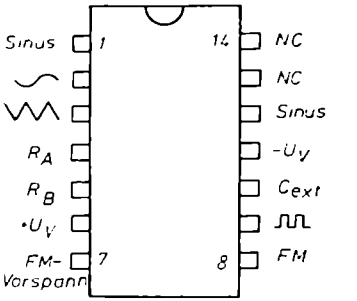
○ Jetzt löten Sie den Sockel für IC 3 ein, wobei Sie mit Lötzinn sehr sparsam umgehen sollten, damit sich nicht ein Kurzschluß zwischen zwei eng nebeneinander liegenden Bahnen ausbilden kann.

○ Zuletzt werden die Schaltkreise IC 1, IC 2, IC 4 eingelötet. Vertauschen Sie die Anschlußdrähte nicht und richten Sie sich genau nach dem Bestückungsplan und den Sockelanschlußbildern.
Zwar sind die ICs gegen thermische Zerstörung infolge Lötens weitgehend unempfindlich, laut Datenblatt soll aber eine Lötdauer von 60 Sekunden bei einer Löttemperatur von ca. 300 °C nicht überschritten werden. Löten Sie also nicht unnötig lange.

○ Vergessen Sie nicht, zwischen den Pins 6 und 11 des ICL 8038 (IC 3) auf der Leiterseite der Printplatte den Kondensator C_{12} einzulöten, wobei der Plusanschluß des Kondensators an Pin 6 liegen muß.

- ◯ Löten Sie die zwei Kabelbrücken (-----) auf der Leiterseite der Printplatte fest
- ◯ Stecken Sie den ICL 8038 richtig herum in den DIL-Sockel, ohne daß sich ein Anschluß verbiegt.
- ◯ Schließlich müssen noch die zwei Kühlsterne auf die Schaltkreise IC 1 und IC 2 aufgesetzt werden. Vermutlich müssen Sie dazu die Kühlsterne zuvor leicht aufbiegen.





Anschlußbelegung IC 3 (von oben gesehen)

Bestückungsplan (von der Bestückungsseite gesehen)

Montage des Gehäuses

Dem Bausatz zum Funktionsgenerator liegt ein komplettes, gebohrtes Gehäuse bei, einschließlich einer beschrifteten Frontplatte.

◯ Da die Achsen der drei Potentiometer sowie der Stufenschalter viel zu lang sind, müssen Sie die Achsen kürzen. Spannen Sie zu diesem Zweck die Achsen der Potentiometer bzw. der beiden Stufenschalter nacheinander in einen Schraubstock und sägen die überschüssige Achslänge mit einer Laubsäge oder einer kleinen Eisensäge ab. Die Achsstummel sollten nicht länger als ca. 10 mm sein. Bitte Spannen Sie nur die Achsen, nicht aber den eigentlichen Potentiometer- bzw. Schaltkörper in den Schraubstock ein, da dieser leicht zerstört werden kann.

◯ Montieren Sie die drei Potentiometer, die beiden Stufenschalter, sowie vier 4-mm-Buchsen, zwei BNC-Buchsen, zwei Miniaturkippschalter und die Leuchtdiodenfassung auf der beschrifteten und gebohrten Alu-Frontplatte fest. Achten Sie darauf, daß Sie die richtigen Potentiometer in den zugehörigen Löchern festschrauben, das gleiche gilt für die Stufenschalter. Die Leuchtdiode LED 1 läßt sich leicht in der zugehörigen Fassung festklemmen.

◯ Schrauben Sie die Kaltgeräte-Steckdose auf der ebenfalls fertig gebohrten und beschrifteten Gehäuserückwand fest, wobei Sie an einer der beiden Befestigungsschrauben noch zusätzlich eine Lötöse zum späteren Anschluß der Erdleitung anbringen müssen. Befestigen Sie außerdem den Einbau-Sicherungshalter an der dafür vorgesehenen Bohrung und setzen Sie gleich die Feinsicherung ein, damit Sie es später nicht vergessen können.

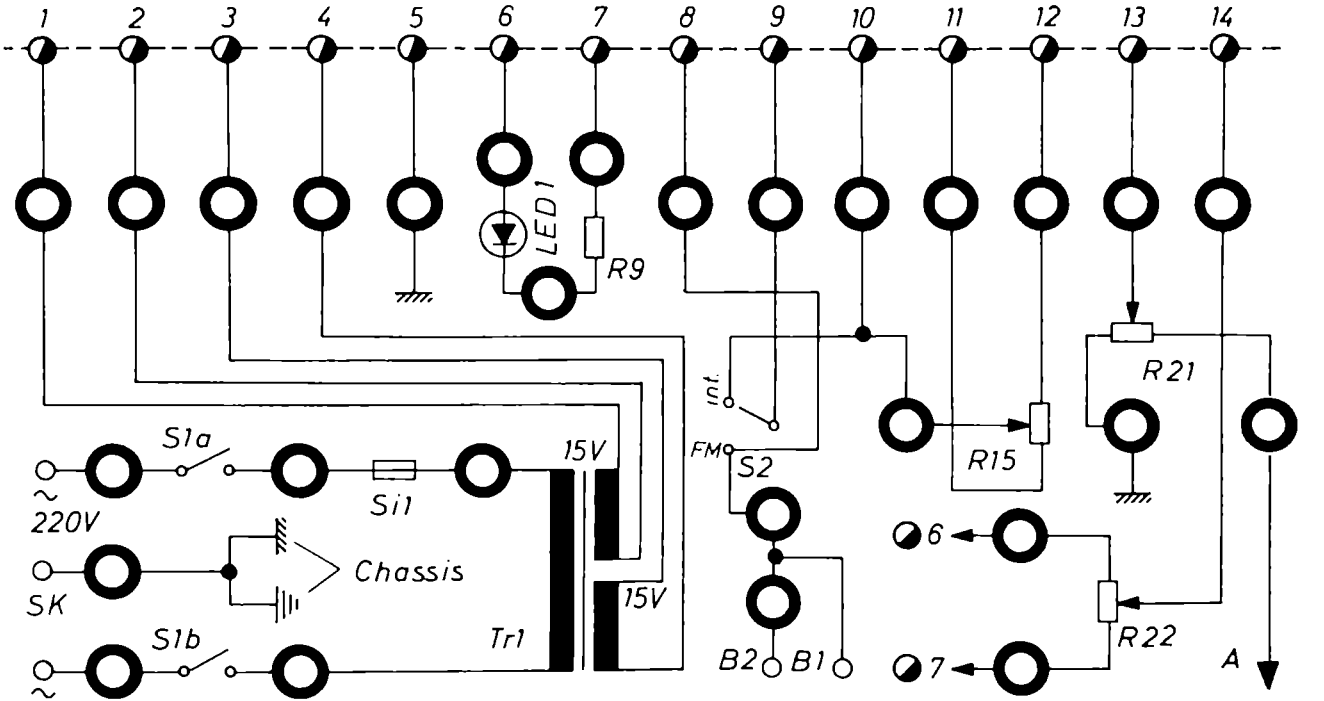
◯ Schrauben Sie jetzt den Netztransformator am Gehäuseboden fest und befestigen Sie zudem unter Zuhilfenahme der vier isolierenden Abstandsröllchen die fertig bestückte Printplatte am Gehäuseboden. Achten Sie darauf, daß Leiterbahnen auf der Printplatte nicht über die metallenen Befestigungsschrauben mit dem Chassis leitend verbunden werden.

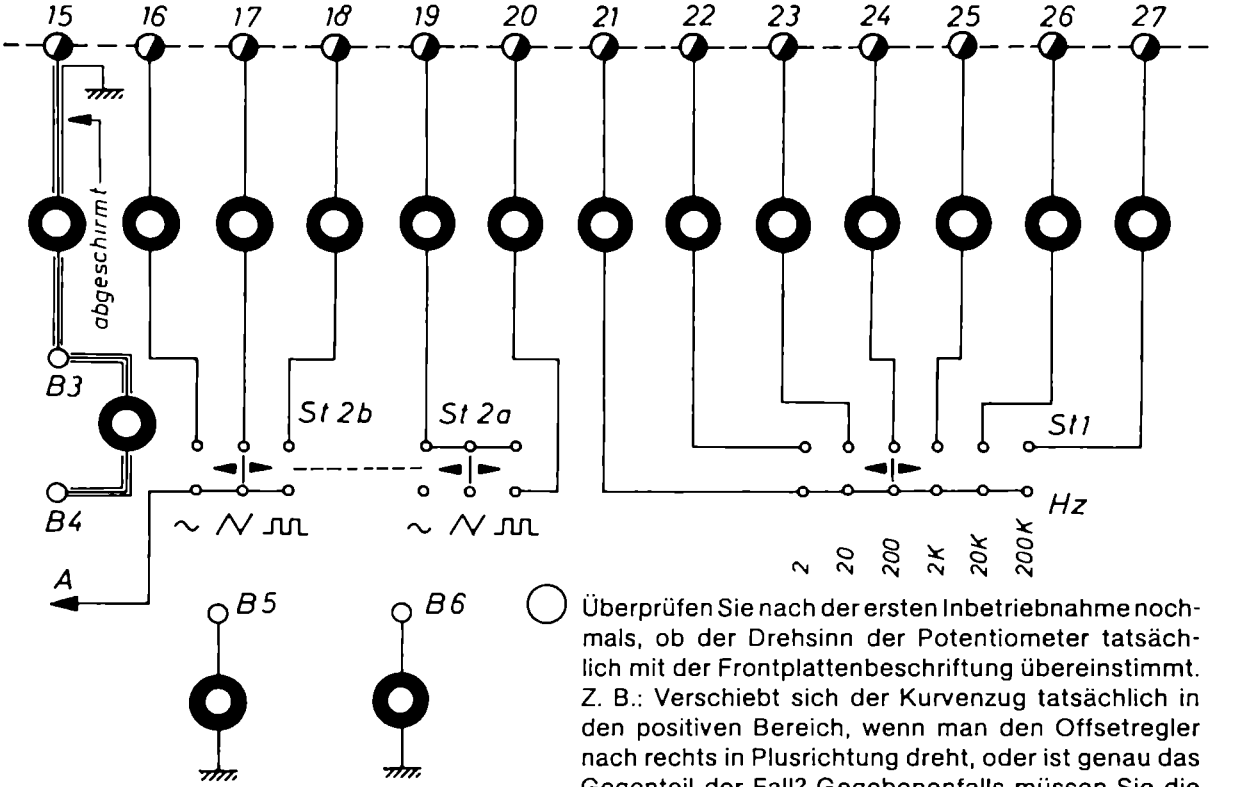
◯ Montieren Sie das Gehäuse, welches aus beschrifteter Frontplatte und Rückwand, zwei Stahlblech-Befestigungsschienen, dem U-förmigen Gehäuseboden und einer ebenfalls U-förmigen Abdeckhaube besteht, unter Zuhilfenahme der beiliegenden Blechschrauben und Unterlegscheiben zusammen. Sie können sich anhand der Bilder 13 und 14 orientieren.

◯ Versehen Sie die drei Potentiometer und die beiden Stufenschalter mit den zugehörigen Drehknöpfen.

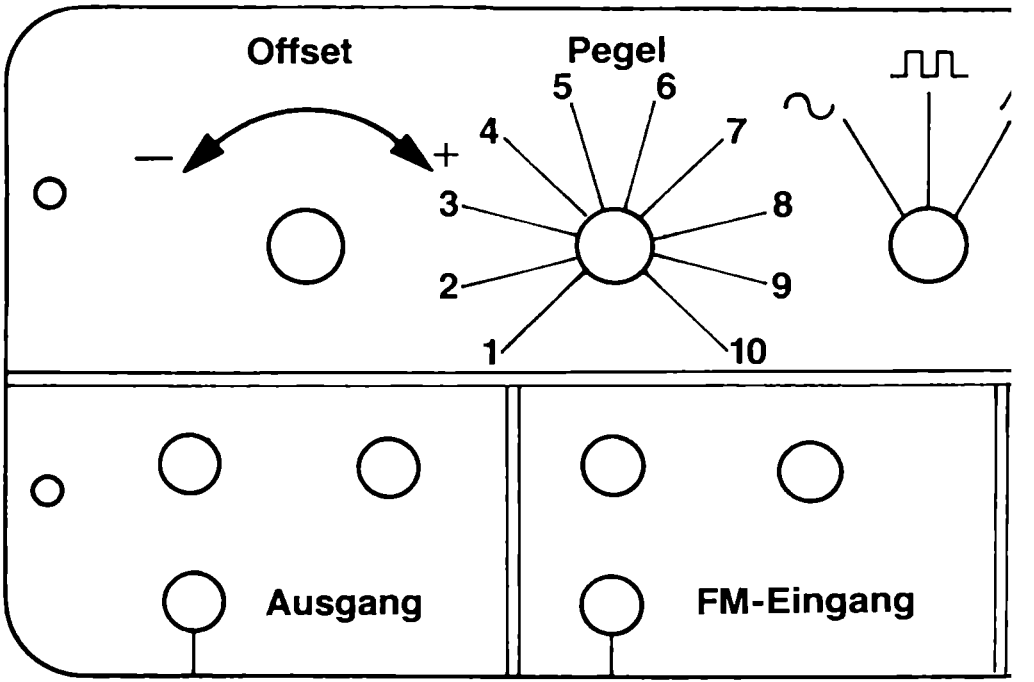
Verdrahtung

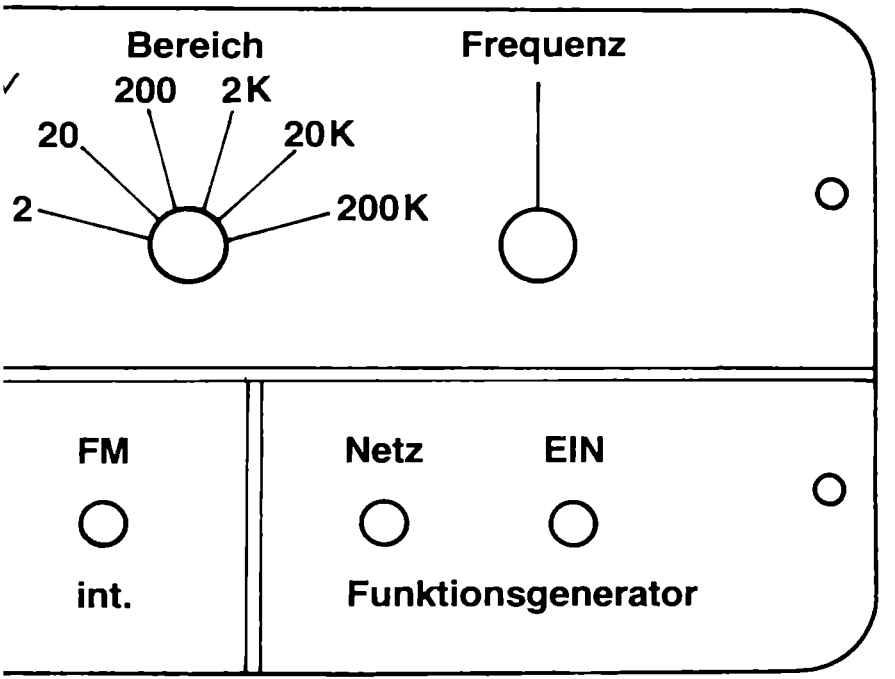
Kreuzen Sie jede Leitung nach dem Einlöten in den Kreisen an.



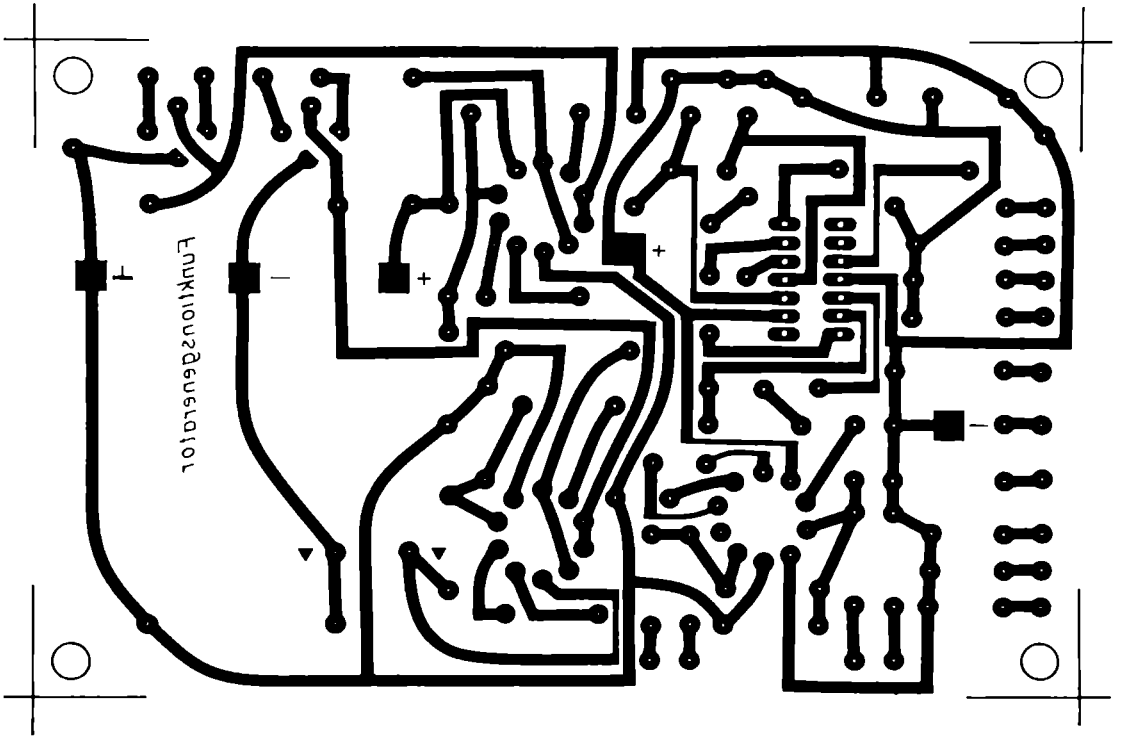


○ Überprüfen Sie nach der ersten Inbetriebnahme nochmals, ob der Drehsinn der Potentiometer tatsächlich mit der Frontplattenbeschriftung übereinstimmt. Z. B.: Verschiebt sich der Kurvenzug tatsächlich in den positiven Bereich, wenn man den Offsetregler nach rechts in Plusrichtung dreht, oder ist genau das Gegenteil der Fall? Gegebenenfalls müssen Sie die beiden äußeren Drähte eines falsch herum angeschlossenen Potentiometers vertauschen.


Offset
Pegel
–
+
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Ausgang
FM-Eingang



Reprovorlage
für die Beschriftung
der Frontplatte



Druckvorlage (seitenverkehrt) für Printplatte.
Legen Sie den Film oder die Pause so auf die Cu-Platte, daß die Schrift lesbar ist.

5. Tafeln

Tafel 1 Zehnerpotenzen

Zehner-potenz	Dezimalstelle	Bezeich-nung	von / in →	Pico	Nano	Mikro	Milli	1	Kilo	Mega	Giga	Tera
10^{-12}	0,000.000.000.001	Pico~	Pico	1	10^{3}	10^{6}	10^{9}	10^{12}	10^{15}	10^{18}	10^{21}	10^{24}
10^{-9}	0,000.000.001	Nano ~	Nano	10^{-3}	1	10^{3}	10^{6}	10^{9}	10^{12}	10^{15}	10^{18}	10^{21}
10^{-6}	0,000.001	Mikro ~	Mikro	10^{-6}	10^{-3}	1	10^{3}	10^{6}	10^{9}	10^{12}	10^{15}	10^{18}
10^{-3}	0,001	Milli ~	Milli	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	1	10^{3}	10^{6}	10^{9}	10^{12}	10^{15}
10^{0}	1		1	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	1	10^{3}	10^{6}	10^{9}	10^{12}
10^{3}	1.000	Kilo ~	Kilo	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	1	10^{3}	10^{6}	10^{9}
10^{6}	1.000.000	Mega ~	Mega	10^{-18}	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	1	10^{3}	10^{6}
10^{9}	1.000.000.000	Giga ~	Giga	10^{-21}	10^{-18}	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	1	10^{3}
10^{12}	1.000.000.000.000	Tera ~	Tera	10^{-24}	10^{-21}	10^{-18}	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	1

Tafel 2 Obere Grenzfrequenz f_{-3dB} – Anstiegszeit τ

f_{-3dB}	τ	f_{-3dB}	τ
100 Hz	3,5 msec	1 MHz	350 nsec
250 Hz	1,4 msec	2,5 MHz	140 nsec
500 Hz	700 µsec	5 MHz	70 nsec
750 Hz	470 µsec	7,5 MHz	47 nsec
1 kHz	350 µsec	10 MHz	35 nsec
2,5 kHz	140 µsec	25 MHz	14 nsec
5 kHz	70 µsec	50 KHz	7 nsec
7,5 kHz	47 µsec	75 MHz	4,7 nsec

f_{-3dB}	τ	f_{-3dB}	τ
10 kHz	35 µsec	100 MHz	3,5 nsec
25 kHz	14 µsec	250 MHz	1,4 nsec
50 kHz	7 µsec	500 MHz	700 psec
75 kHz	4,7 µsec	750 MHz	470 psec
100 kHz	3,5 µsec	1 GHz	350 psec
250 kHz	1,4 µsec	2,5 GHz	140 psec
500 kHz	700 nsec	5 GHz	70 psec
750 kHz	470 nsec	7,5 GHz	47 psec
		10 GHz	35 psec

Tafel 3 dB-Zahl – Spannungsverhältnis (U_e/U_o)

dB	U_e/U_o	dB	U_e/U_o
0	1,00	0	1,00
0,1	1,01	−0,1	0,99
0,2	1,02	−0,2	0,98
0,3	1,04	−0,3	0,96
0,4	1,05	−0,4	0,95
0,5	1,06	−0,5	0,94
0,6	1,07	−0,6	0,93
0,7	1,08	−0,7	0,92
0,8	1,10	−0,8	0,91
0,9	1,11	−0,9	0,90
1	1,12	−1	0,89
2	1,26	−2	0,79
3	$1{,}41 = \sqrt{2}$	−3	$0{,}71 = 1/\sqrt{2}$
4	1,59	−4	0,63
5	1,78	−5	0,56

dB	U_e/U_o	dB	U_e/U_o
6	2,00	−6	0,50
7	2,24	−7	0,45
8	2,51	−8	0,37
9	2,82	−9	0,35
10	3,16	−10	0,32
20	10	−20	0,10
30	31,6	−30	0,032
40	100	−40	0,01
50	316	−50	0,0032
60	1000	−60	0,001
70	3160	−70	0,00032
80	10.000	−80	0,0001
90	31.600	−90	0,000032
100	100.000	−100	0,00001

Tafel 4
Internationaler Farbcode zur Kennzeichnung von Widerständen und Kondensatoren

	1. Farbring = 1. Ziffer	2. Farbring = 2. Ziffer	3. Farbring = Anzahl der Nullen
schwarz	0	0	keine Null
braun	1	1	0
rot	2	2	00
orange	3	3	000
gelb	4	4	0000
grün	5	5	00000
blau	6	6	000000
violett	7	7	0000000
grau	8	8	--
weiß	9	9	--

Ausbildung für Freizeit und Beruf durch bewährten Fernunterricht:

Informationen kostenlos und unverbindlich.

Die Fernschule in Bremen

Postfach 347026 / FV – 2800 Bremen 34

Amateur-Funklizenz*
See-Funksprechzeugnis*
Jedermann/Hobbyfunk
Fernsehtechnik + Reparaturpraxis*
Elektronik + Halbleitertechnik
Elektrische Meßtechnik

* Diese Lehrgänge sind durch das Bundesinstitut für Berufsbildung geprüft und als „geeignet" beurteilt worden

Buchreihe Elektronik

Die TOPP-Buchreihe Elektronik umfaßt mehr als 100 Titel. Übersetzungen erscheinen in Englisch, Französisch, Holländisch, Schwedisch und Spanisch. Wir senden Ihnen gern eine Titelübersicht und den Prospekt „Welche Schaltung suchen Sie" mit mehr als 1000 Hinweisen auf bereits erschienene Schaltungen.

FRECH-VERLAG 7000 STUTTGART

Diese Buchreihe macht moderne Elektronik verständlich; sie fördert das Fachwissen, und der weitgespannte, praxisbezogene Themenkreis weckt das Interesse am Aufbau von Schaltungen und an eigenen Experimenten. Für viele wurde Elektronik durch die zuverlässigen Bauanleitungen zum faszinierenden Hobby.

TOPP

Baubücher
bringen außer
den Schaltbildern
Verdrahtungspläne
und Anleitungen
für den Aufbau
einsatzbereiter
Geräte

BAUBUCH

ISBN 3-7724-039-3

Dieser Band enthält eine komplette Bauanleitung für einen Funktionsgenerator, der mit dem ICL 8038 aufgebaut wurde. Der Frequenzbereich des beschriebenen Gerätes reicht von 0,02 Hz bis 200.000 Hz, Amplitude und Offset sind in weiten Grenzen einstellbar. Die Ausgangsfrequenz kann zudem über einen besonderen Eingang mit Hilfe einer externen Steuerspannung frequenzmoduliert werden. Der Ausgang ist umschaltbar auf Sinus, Dreieck und Rechteck, zusätzlich können auch Sägezahnfunktionen erzeugt werden.

Zu dieser sehr ausführlich gehaltenen Bauanleitung, die neben den Schaltplänen auch noch Printvorlagen, Bestückungspläne, Konstruktionszeichnungen und Verdrahtungspläne enthält, ist ein vollständiger Bausatz lieferbar. Der Bausatz enthält alle zum Nachbau des Gerätes erforderlichen Einzelteile einschließlich einer gebohrten und beschrifteten Frontplatte, der Printplatte und des Gehäuses, so daß sich der Nachbau des Funktionsgenerators sehr einfach gestaltet.